

基于 CFD 混流式水轮机转轮空化及涡旋流动数值模拟

孟小瑞

(河南省水利水电学校, 河南 周口 466001)

摘要: 采用 RNK 湍流模型和压力速度耦合的 SIMPLEC 算法, 基于欧拉-欧拉方法中均匀多相流假设的混合两相流体无滑移模型, 选用 Schnerr and Sauer 空化模型, 对混流式水轮机转轮进行三维空化湍流数值模拟。利用 ANSYS CFX, 通过转轮的汽含率云图、流线图、turbo 面分析以及转轮进出口压力、速度曲线分析, 获得了该水轮机在大开度、小开度下的转轮、叶片以及泄水锥的空泡、涡旋黏度等主要流动特征。计算结果表明: 大开度和小开度对转轮的空化影响不同, 存在一定规律, 即大开度下空化严重而范围比较集中; 小开度下空化较轻但发生范围较广; 大开度下涡旋黏度偏大, 则空泡不宜脱流, 即不容易在叶片上产生漩涡; 小开度则涡旋黏度小, 即叶片上漩涡明显。

关键词: 水轮机转轮; 空化; 涡旋黏度; 漩涡; 大开度; 小开度

中图分类号: TV136⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0173-05

Numerical simulation of the cavitation and vortex flow of francis turbine runner based on CFD

MENG Xiaorui

(Henan Province Water Conservancy and Hydropower School, Zhoukou 466001, China)

Abstract: In this paper, the SIMPLEC algorithm which coupled RNK turbulence model with pressure-velocity was applied to numerically simulate three-dimensional cavitating turbulent of Francis turbine runner based on mixed two phase fluid no sliding model of Euler-Euler method with the assumption of homogeneous multiphase flow. The Schnerr and Sauer cavitation models were selected. Using the software of ANSYS CFX, with the runner gas-holdup cloud, based on the flow chart, turbo-surface analysis, runner pressure or velocity curve analysis, the main flow characteristics of Francis turbine runner about cavitation and vortex viscosity in the large and small open flow were obtained. The calculation results showed that the effects of cavitation on the runner under the large and small open flow were different and there occurred certain law, i. e., under large open degree, there was more severe cavitation and the scope was concentrated; while under small open degree, there was slight cavitation but the occurrence areas was large. There was large eddy viscosity under large opening, the cavity was not easy to take off flow, i. e., it was not easy to produce vane vortex. At a small open degree, the eddy viscosity was small, the vortex was obvious on the blade.

Key words: hydraulic turbine runner; cavitation; eddy viscosity; vortex; large-open flow; small-open flow

在水力机械运行过程中,空化是普遍存在的一种现象,且包含相变、湍流等复杂的流动现象^[1]。空化现象是由于液体中的局部低压(低于相应温度下该液体的饱和蒸汽压)使液体气化而引发的微气泡(或称气核)爆发性生长现象^[2-3]。空化现象最早发现于1893年,当英国一艘驱逐舰在做高速试航时,发现其螺旋桨推进器叶片被剥蚀,其后在水力机

械(水泵、水轮机)的叶片上也发现了类似情况^[4]。近年来对空化的研究在国内外均引起重视,专家学者也都从不同角度、不同领域展开了内容丰富的探讨,取得了大量的成果。不断有新的观点和论述被提出,不同专业所积累的成果相互借鉴、融合,使得对这一问题的研究得到了空前的发展。

随着计算机应用技术的快速发展,计算流体力学

收稿日期:2016-12-14; 修回日期:2017-01-19

作者简介:孟小瑞(1967-),女,河南舞阳人,学士,高级讲师,主要研究方向:水利、土木工程新型建筑材料特性及施工质量控制。

力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术也得到了推广,已广泛应用于水轮机等水力机械的水力性能预测和设计中^[5-7],本文通过利用 CFD 仿真模拟软件,对水轮机全流道空化流动进行数值计算,对水轮机核心部件转轮在偏工况大小开度下的空化流动与涡旋黏度之间的关系规律进行了探讨。

1 空化模型与控制方程

基于两相流空泡模型,空化系统采用二流体三成分:水、蒸汽和不可压缩气体。其主要控制方程有连续方程、动量方程如下:

液体相:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 + \alpha)\rho_1] + \nabla \cdot [(1 + \alpha)\rho_1 V] = -R \quad (1)$$

空泡相:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho_v) + \nabla \cdot (\alpha\rho_v V) = R \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho) + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \frac{1}{3} \nabla [(\mu + \mu_i) \nabla \cdot V] + \nabla \cdot [(\mu + \mu_i) \nabla V] + \rho g \quad (4)$$

式中: α 为空泡体积分数; ρ_1 为液体相密度、 ρ_v 空泡相密度、 ρ 为混合相的密度, kg/m^3 , $\rho = \alpha\rho_v + (1 - \alpha)\rho_1$; V 为速度矢量; R 为净相变率; μ 为混合流体的动力黏性系数; μ_i 为混合流体的湍流黏性系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

应用 Singhal 空化模型。Singhal 模型是目前比较完整的空化模型,基于汽液两相流,通过混合流体推出相间转换率,考虑了相变、表面张力、湍流动能等导致的压力脉动、非凝结性气体质量分数这些影响空化发生的主要因素。相变率如下:

$$R_c = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_1 \rho_v \left(\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - y_v - y_g), p < p_v \quad (5)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_1 \rho_v \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - y_v), p > p_v \quad (6)$$

式中: p_v 为饱和蒸气压, Pa, 取 $p_v = 3170$ Pa; ρ_1 为水的密度, kg/m^3 , 取 $\rho_1 = 1000$ kg/m^3 ; ρ_v 为水蒸气密度, kg/m^3 , 取 $\rho_v = 0.02558$ kg/m^3 ; C_e 和 C_c 为随蒸发和凝结程度不同而变化的经验系数,分别为 0.02 和 0.01; y_v 为汽相质量分数; y_g 为非凝结性气体质量分数; V_{ch} 为时特征速度,反映汽、液两相之间的相

对速度, m/s ; σ 为表面张力, N/m 。

由于紊流脉动的影响,临界饱和蒸汽压公式如下:

$$p_v = p_s + \frac{1}{2} p'_i \quad (7)$$

式中: p_s 为饱和蒸汽压, Pa; $p'_i = 0.39 \rho k$ 。

考虑到水轮机内部强烈旋转的三维流动容易产生漩涡以及流动分离,因此本计算中采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型来进行计算^[8-9]。

2 数值方法

为保证在不同的域交界面流量的连续性,应采用 Simplec 算法,实现速度和压力的耦合求解。进口边界条件设置为速度进口,并设置湍流量 k, ε ; 出口边界条件设置为自由出流,可以综合实际再更改边界类型; 固壁面采用壁面无滑移边界条件^[10-12]。

3 计算域和网格划分

3.1 计算域

计算应用转轮模型。图 1 为该模拟试验研究的转轮叶片模型,图 2 为该转轮流域模型。叶片个数为 15, 计算采用工作水头为 8 m, 单位转速为 62 r/min, 单位流量为 180 L/s。



图 1 叶片模型

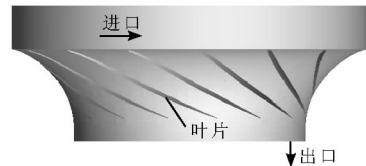


图 2 水轮机装置全流道计算区域

3.2 网格划分及网格无关性验证

水轮机转轮所有流道都是流体区域,应用相关 Bladegen、Turbogrid 软件划分结构化网格。考虑到网格数量对计算结果的影响,分别画出了 5 种方案的结构化网格,并做网格无关性验证,表 1 为 5 种网格方案的网格单元数的分布。

图 3 中曲线 1 表示计算精度与网格数量之间的变化关系曲线,曲线 2 表示与计算时间关系变化曲线,从变化曲线中可以看出,随着网格数量的增加计算精度有所提高后又降低,网格数量的增多则延长了计算时间。综合考虑 1、2 变化曲线,确定方案 3 (网格数量 1 686 670) 为最佳设计网格数量。因此,采用方案 3 的网格用于分析模拟计算。图 4 为方案 3 的转轮网格模型图。

表 1 5 种方案的网格数量分布

方案	1	2	3	4	5
转轮网格单元数	502150	1023254	1686670	2128600	2567110

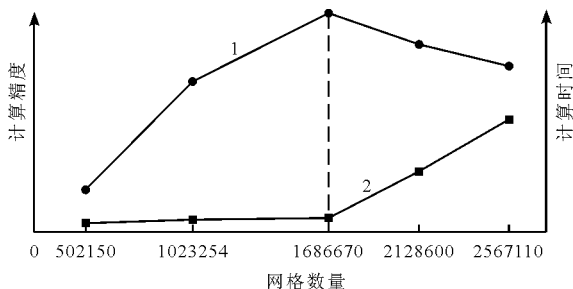


图 3 计算精度和时间与网格数量的变化关系

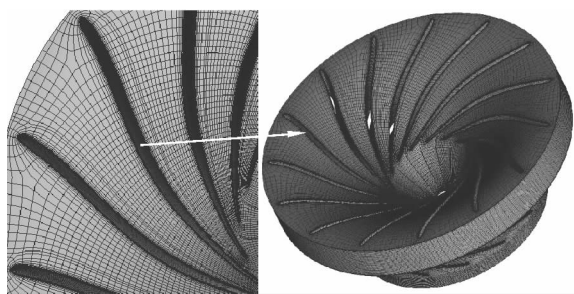


图 4 转轮网格模型

4 计算结果分析

4.1 转轮区域内空化流动分析

由于在非设计工况下容易发生空化,因此主要选取在偏工况下的小开度和大开度 2 种工况进行三维定常空化湍流数值模拟研究。小开度选取近似小开度为 6 mm(25%),空化系数为 0.008;大开度选取近似开度为 13 mm(90%),空化系数为 0.1。

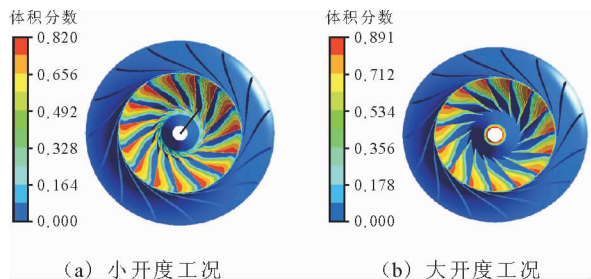


图 5 气泡体积分数对比图

如图 5 为小开度和大开度工况水轮机转轮空化气泡分布云图,对比小开度和大开度转轮气泡云图发现:小开度下空泡最大体积分数为 82.0%;大开度下空泡最大体积分数为 89.1%,显然大开度的局

部空化程度较小开度严重。

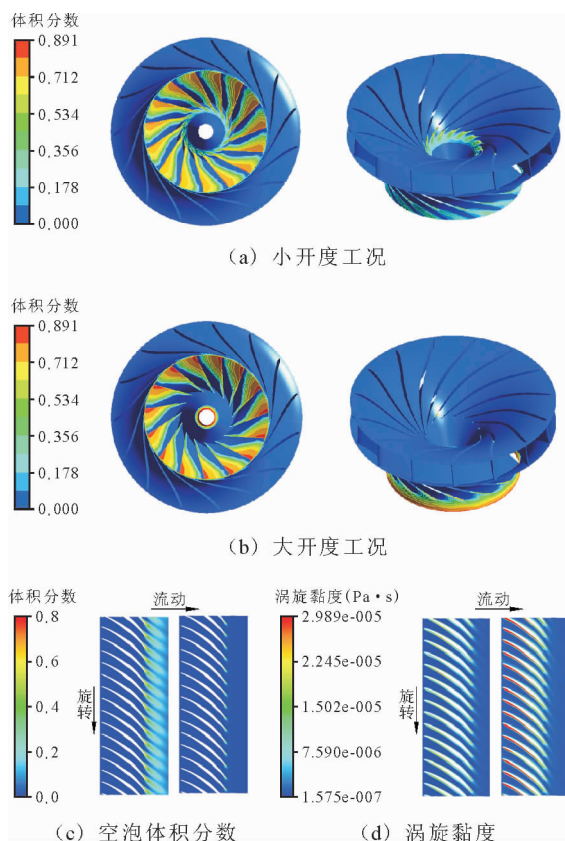


图 6 同标尺对比图

为了较清晰地比较大开度和小开度转轮空化范围,建立小开度和大开度同标尺对比云图如图 6 所示。从图 6(a)、6(b)可以看出:大开度的空化范围明显低于小开度,但局部空化程度要高于小开度;随着流量变大,大开度的空化出现转移,由泄水锥顶部的无空化转移到泄水锥底部空化比较集中,上冠底部空化减弱,下环底部空化加强,其原因主要是因为随着开度的增大,过流面的流量也增大,则转轮转速提高,使空化向转轮底部转移;由图 6(c)空泡体积分数也可以看出大开度下叶片底部的空化范围比小开度小;图 6(d)是叶片上涡旋黏度的分布图,涡旋黏度体现了空泡脱流的难易程度^[13],可以看出大开度下涡旋黏度偏大,则空泡不宜脱流,即不容易在叶片上产生漩涡,漩涡小;小开度则涡旋黏度小,容易产生漩涡,叶片上漩涡大。

4.2 叶片区域空化流动分析

4.2.1 压力云图分析 由于水轮机叶片的空间扭曲度比较大,这是引起空化发生的潜在因素之一。

叶片工作面上的空化程度分布情况如图 7 所示,背面上空化分布如图 8 所示。从图 7、图 8 可以

看出:当小开度工况下,在叶片的工作面和背面都有不同程度的空化发生,只是叶片工作面上有局部空化,在其出水边靠近上冠部分局部有少量空泡且呈星点状分布^[14],即翼型空化现象;大开度工况下叶片的工作面无空化现象,空化的发生主要集中在叶片的背面,且向下环集中;通过小开度与大开度工况的对比可知,无论是叶片的工作面还是背面,大开度下的空化范围比小开度的范围要小。

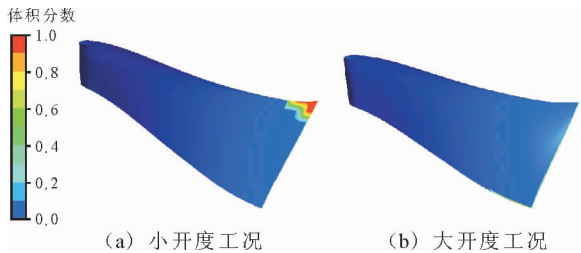


图7 叶片工作面空泡体积分数分布

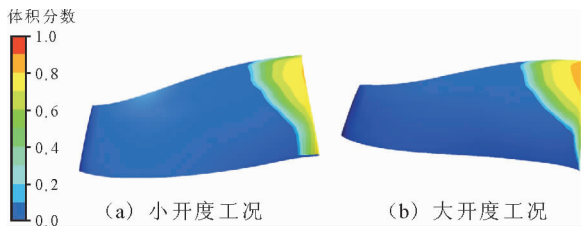


图8 叶片背面空泡体积分数分布

4.2.2 转轮空化流线分析 该计算模拟流场流线结果如图9所示。结果表明,在小开度流量工况时,水轮机转轮流道内水流是不稳定的,涡旋明显,而且位置在转移,在靠近叶片吸力面存在较大旋涡(如图9(a)中第2个图所示),水轮机运转不稳定;在大开度工况下,水轮机转轮内的流线比较紊乱,存在叶道涡,在叶片的背面几乎不存在漩涡或漩涡很小(如图9(b)中第2个图所示)。因此,无论是大开度还

是小开度叶片间均存在叶道涡,这是由于所选工况均在偏离工况下进行模拟计算,所以当流体由活动导叶流入转轮中时,在叶片上必然发生脱流,然后在流道中也会形成叶道涡^[15]。

4.3 叶片的压强及速度变化曲线

图10、图11分别表示叶片表面绝对压力和绝对速度值沿 streamwise 的变化情况,截面为 $\text{span} = 0.5$ 。图10和图11中位于上方的两条曲线为叶片压力面数据,下方两条曲线为吸力面数据。由图10可以看出,除了吸力面进口前缘外,大开度和小开度下叶片表面压力变化趋势是类似的,大致是由叶片进口向出口逐渐降低,无阶跃性变化,大开度下压力比小开度下压力大,但在出口附近两个工况压力值逐渐逼近,尤其是在吸力面甚至出现了一部分重合;由图11可以看出,速度在进口处有不稳定波动后呈缓慢波动性变化,大开度工况压力面和吸力面的速度均比小开度工况压力面和吸力面的速度大,这是因为开度越大则流量越大的缘故,速度的波动变化主要是因为转轮在旋转过程中产生了部分漩涡所导致。

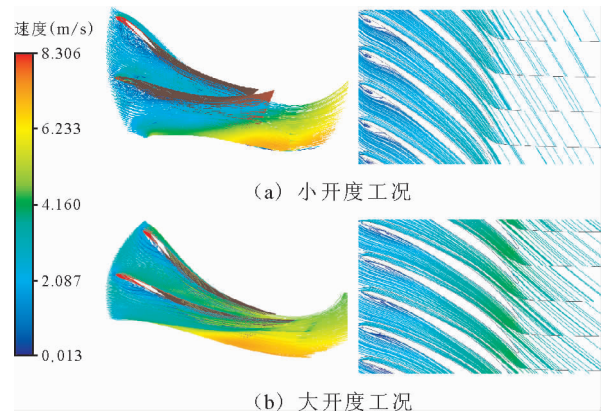


图9 叶片流场流线分布图

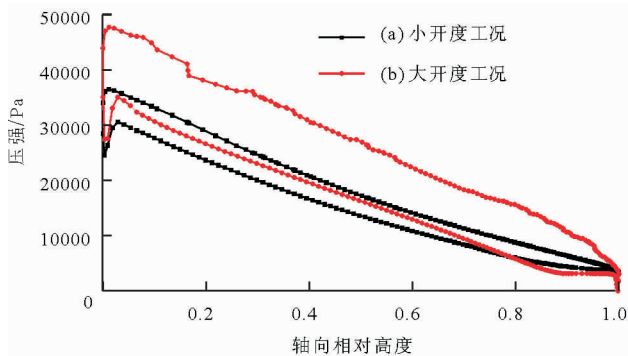


图10 叶片表面压力分布

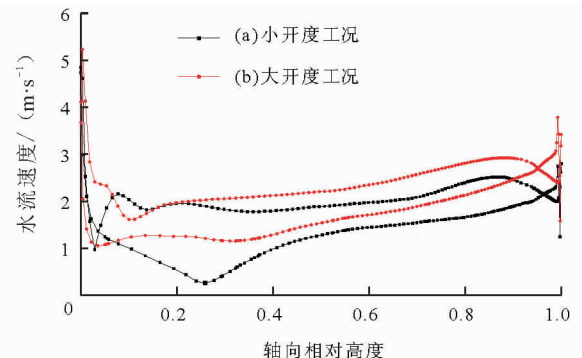


图11 叶片表面速度分布

5 结 论

通过数值计算,模拟了混流式水轮机模型的转轮内部流场,并从多个方面分析了转轮在大开度和小开度工况下的空化、叶道涡情况,进行总结分析得到以下结论:

(1)转轮在大开度工况比小开度工况下的空化强度大,大开度工况的空化范围小而集中,小开度工况空化发生区域广;大开度的空化出现转移,由泄水锥顶部无空化转移到泄水锥底部空化比较集中,上冠底部空化减弱,下环底部空化加强。

(2)小开度工况下,在叶片的工作面和背面都有不同程度的空化发生;大开度工况下叶片的工作面无空化现象,空化的发生主要集中在叶片的背面;

(3)大开度下涡旋黏度偏大,则空泡不宜脱流,即不容易在叶片上产生漩涡,漩涡微弱;小开度则涡旋黏度小,容易产生漩涡,叶片上漩涡明显;

(4)在偏离工况下进行模拟计算,无论是大开度还是小开度叶片间均存在叶道涡。

参考文献:

- [1] 王鑫,刘小兵,赵琴等. 多孔翼型对空化影响规律探讨[J]. 中国农村水利水电,2016(10):141-145.
- [2] 张勇. 水轮机叶片头部背面初生空化 CFD 分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009:15-69.
- [3] 赵亚萍,廖伟丽,李志华,等. 轴流式水轮机叶片进水边形状对其性能的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(13):94-99.
- [4] 蔡标华. 射流泵初生空化及其试验研究[D]. 武汉:武

汉大学,2005.

- [5] Ding H, Visser F G, Jiang Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications [J]. Journal of fluids engineering, 2011, 133(1): 1-14.
- [6] Byskov R K, Jacobsen C B, Pedersen N. Flow in a centrifugal pump at design and off - design conditions - part II: large eddy simulations [J]. Journal of fluids engineering, 2003, 125(1): 73-83.
- [7] Dysson G, Teixeira J. Investigation of closed valve operation using computational fluid dynamic [C] // . Proceedings of the ASME 2009 Fluid Engineering Division Summer Meeting, 2009.
- [8] 陈庆光,徐忠,张永建. RNG $k-\varepsilon$ 模式在工程湍流数值计算中的应用[J]. 力学季刊,2003,24(1):88-95.
- [9] 唐学林,贾玉霞,王福军,等. 基于修正的 RNG $k-\varepsilon$ 模型的水翼空化数值模拟[J]. 工程热物理学报,2012,33(9):1514-1518.
- [10] 曹芳滨. 基于 CFD 的长短叶片水轮机转轮三维空化数值模拟[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.
- [11] 马国华. 带副叶片混流式水轮机转轮内部空化流场数值模拟[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
- [12] 黄剑峰. 水轮机内部非定常湍流的数值模拟研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.
- [13] 王健. 水力装置空化空蚀数值计算与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2015.
- [14] 黄剑峰,张立翔,姚激,等. 混流式水轮机三维空化湍流场混合数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2011,31(32):115-121.
- [15] 李继栋. 低比速水轮机转轮短叶片对水力性能影响的研究[D]. 成都:西华大学,2012.