

基于透平正向设计模式的液力透平数值仿真研究

胡文立¹, 阳君^{1*}, 钟华舟², 张金凤³, 廖振阳¹

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²合肥市太泽透平技术有限公司, 安徽 合肥

³江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江

Email: *yangjun@usst.edu.cn

收稿日期: 2021年6月16日; 录用日期: 2021年7月20日; 发布日期: 2021年7月28日

摘要

为进行液力透平正向设计模式的成熟化应用探索, 该文以某一型号两级液力透平参数为设计目标, 利用国内自主研发的TurboTides软件进行透平正向设计及数值仿真。以该透平为对象, 分别利用TurboTides与ANSYS CFX平台在不同流量工况下对透平内部流动进行数值计算, 以初步验证国内自主研发平台在液力透平正向设计和CFD数值计算上的可靠性, 针对多级液力透平内部气液两相流动进行了初步研究分析。结果表明: 在主要运行工况下和误差允许范围内, TurboTides单流道周期性网格计算的精确性不亚于CFX的全流道计算结果, 且其计算更加节省计算资源和时间, 在工程设计中采用TurboTides进行液力透平设计及计算有较大优势。同时初步推测, 该两级液力透平靠近出口工作级的低压区易发生工质汽化导致气液两相流动。多级液力透平内部低压区的工质汽化有可能是其气液两相流动发生的主要原因之一。

关键词

液力透平, 正向设计, 空化, 气液两相流动, 数值计算

Research on Numerical Simulation of Hydraulic Turbine Based on Turbine Forward Design Method

Wenli Hu¹, Jun Yang^{1*}, Huazhou Zhong², Jinfeng Zhang³, Zhenyang Liao¹

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Hefei TurboTides Turbine Technology Co., Ltd., Hefei Anhui

³Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Email: *yangjun@usst.edu.cn

*通讯作者。

Abstract

In order to explore the mature application of forward design mode of hydraulic turbine, the parameters of a two-stage hydraulic turbine were taken as the design objective, and the domestic independently developed software TurboTides was used to carry out forward design and numerical simulation of the turbine. Based on the turbine, the TurboTides and ANSYS CFX were used to perform numerical calculations on the internal flow of the turbine under different flow conditions to preliminarily verify the reliability of the domestic independent research and development platform in the hydraulic turbine forward design and numerical calculation. The gas-liquid two-phase flow in multi-stage hydraulic turbine was preliminarily studied. The results show that: under the main operating conditions and within the allowable error range, the accuracy of TurboTides single channel periodic grid calculation is no less than that of CFX full channel calculation, and its calculation saves more calculation resources and time, so it has great advantages in engineering design. At the same time, it is preliminarily speculated that the low pressure area of the two-stage hydraulic turbine working stage near the outlet is easy to have cavitation, resulting in two-phase flow of gas and liquid. The cavitation of the working fluid in the low-pressure area inside the multi-stage hydraulic turbine may be one of the main reasons for the occurrence of the gas-liquid two-phase flow.

Keywords

Hydraulic Turbine, Forward Design, Cavitation, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Numerical Calculation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

液力透平是将液体工质压能转变为可利用机械能的设备，在工业各领域生产中扮演着重要角色[1]。目前液力透平的设计主要采用模型设计法，具体可分为液力透平正向设计模式和泵反转设计模式(Pump as Turbine, PAT)，其中 PAT 设计模式需要将透平参数转换为泵工作状态下的参数进行设计，是目前工业上液力透平设计的主要方法[2] [3]。同时，PAT 设计模式由于具有成本低、经济可行、适用面广等优点，在许多缺乏电力供应的地区受到广泛关注和应用，以微型水电项目的形式满足当地的能源需求[4] [5] [6]。但泵出厂时，制造商通常不提供泵在透平工况下的性能参数。因此，PAT 设计过程中需要考虑如何选择合适的泵作为透平[7] [8]。与之相比，正向设计模式的液力透平直接以透平理论进行设计，工作效率高，稳定性好，且正向设计获得模型后数据更为直观，可根据工质物性参数变化对模型进行调整，相比 PAT 设计模式更有优势[9]，但目前工业液力透平设计上较少应用该方式。因此，对液力透平正向设计模式的成熟化应用进行探索研究是很有必要的。

对于液力透平来说，叶轮是最核心的过流部件，其水力设计在设计过程中也十分关键[10]。根据输入条件的不同，叶轮水力设计方法可分为正问题方法和反问题方法：正问题设计是已知通流部件的几何参数，来求出流场的速度分布，即给定叶轮叶片的几何造型参数，求解流场；反问题设计则需要一开始提供工质、转速、流量、叶型表面的速度、压力分布等，根据一系列叶片设计要求确定叶型的几何参数，

根据预测得到的叶片表面速度和静压分布等数值计算的结果对叶片几何参数进行多次修改,直至与给定参数之间的差距达到一定精度要求[11][12][13]。根据叶轮轴面流动的不同假设,叶轮设计理论又可分为一元设计理论、二元设计理论和三元设计理论,其中三元设计理论可以将三元问题降为两个二元问题的准三元流动理论形式应用[14][15][16]。陶丽萍等[12]利用 ADT 公司的 Turbo Design 软件实现了基于叶片载荷分布的离心叶轮三元反问题设计,对叶片载荷分布对离心叶轮性能的影响进行了研究,得到了不同载荷分布对叶轮外特性、几何结构及内流场的影响。刘莹莹等[17]设计了 3 种不同比转速的前弯型叶片,对液力透平内部流动进行数值计算,获得了该 3 种比转速的液力透平的外特性曲线,研究了效率、扬程、功率随着流量的变化规律。Krzemianowski [18]对水轮机导叶和叶轮叶片进行了反问题的设计,并以数值计算和试验方式证明其工作可靠。吴子娟等[19]研究了不同流量工况下叶轮下环间隙对液力透平内部流动特性的影响,发现不同流量下不同大小的下环间隙对透平内部流动具体影响不同。杨孙圣等[20]对透平进行蜗壳出口倾斜处理,通过试验和数值模拟方法相结合发现蜗壳出口倾斜后透平内部环流损失更小,内部水力损失略有增大,但总水力损失减小。苗森春等[21]对不同转速下的液力透平进行数值模拟,得到了不同转速下液力透平的外特性曲线。目前,叶轮设计研究多以泵叶轮设计为对象,考虑气液两相流动等因素对透平性能影响相关的研究还较少。

在液力透平设计上,之前多采用 ADT 公司的 TurboDesign 系列软件等国外设计软件,但要提高我国液力透平自主研发设计能力,在核心工业机械上追赶国外先进水平,同时摆脱国外软件限制封锁,就必须开发出拥有完全自主知识产权的透平设计研发平台。因此,为进行液力透平正向设计模式的成熟化应用探索,文中使用太泽公司研发,国内首个拥有自主知识产权的透平反问题设计软件 TurboTides 进行设计,建立两级液力透平模型,分别利用 TurboTides 与 ANSYS CFX 平台在不同流量工况下对透平内部流动进行数值计算,以初步验证国内自主研发平台在液力透平正向设计和 CFD 数值计算上的可靠性,并基于 CFX 平台针对透平内部气液两相流动进行了初步研究分析。

2. 液力透平几何模型及模拟计算

2.1. 液力透平三维模型

以某一型号两级液力透平的参数为设计目标,具体参数如下所列:进口总压 $p_{in} = 16.5 \text{ Mpa}$,进口总温 $T_{in} = 323 \text{ K}$,体积流量 $Q_d = 15.3 \text{ kg/s}$,额定转速 $n = 2985 \text{ r/min}$,出口总压 $p_{out} = 13.5 \text{ Mpa}$ 。在 TurboTides 的一维设计模块中选择水作为工质并输入以上设计参数,级数为 2,两级均选择常规叶片导叶,首级为闭式叶轮带有叶片回流通道的,尾级则为闭式叶轮带有出口扩压段作为在利用 TurboTides 软件设计生成两级液力透平的几何模型。在几何模块中,设置蜗壳面积分布为线性,进口截面积比为 0.05,出口管长度为 120 mm,长宽比均为 1。表 1 列出了透平主要过流部件叶轮及蜗壳几何参数,设计模型如图 1 所示,其过流部件包括蜗壳、一级导叶、一级叶轮、中间导叶、二级导叶、二级叶轮六个部分,其中中间导叶与二级导叶间存在 180° 的大转角流域,两者以此结构过渡,各级导叶叶片数 $Z_1 = 13$,各级叶轮叶片数 $Z_2 = 11$,叶轮直径 $D = 182 \text{ mm}$ 。

Table 1. Main geometric parameters of hydraulic turbine

表 1. 液力透平主要过流部件几何参数

过流部件	参数	值
两级叶轮	叶轮出口直径 D_1/mm	60.00
	叶轮进口直径 D_2/mm	182.00
	叶轮轮毂直径 D_h/mm	32.50

Continued

两级叶轮	叶片进口角 $\beta_2/(\circ)$	70.00
	前盖板叶片出口角 $\beta_{1f}/(\circ)$	35.00
	后盖板叶片出口角 $\beta_{1r}/(\circ)$	51.00
	叶片进口宽度 b_2/mm	3.50
	前盖板叶片包角 $\varphi_f/(\circ)$	44.50
	后盖板叶片包角 $\varphi_r/(\circ)$	36.80
蜗壳	蜗壳基圆直径 D_3/mm	232.00
	蜗壳进口管长度 L_1/mm	120.00
	蜗壳进口直径 D_4/mm	50.00

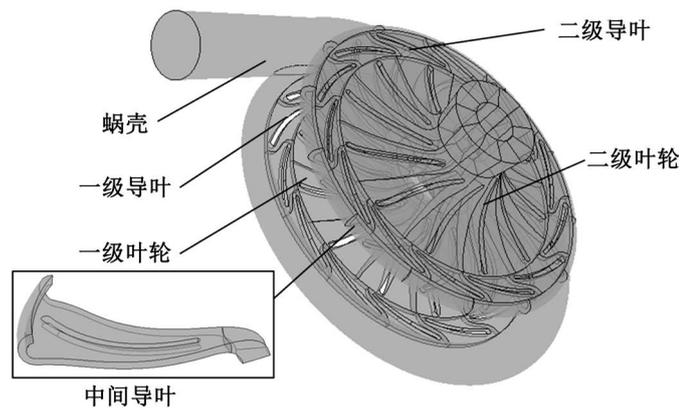
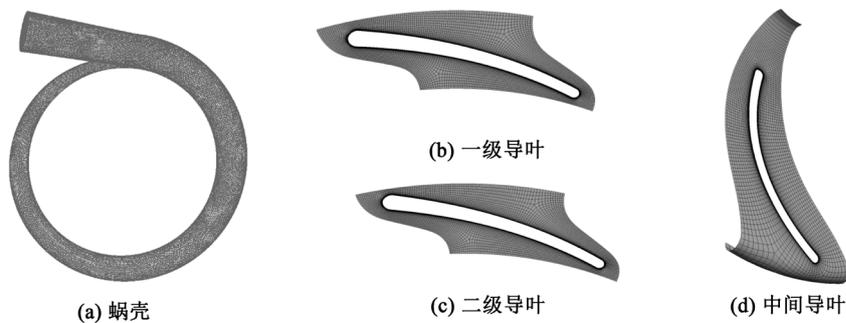


Figure 1. Three-dimensional geometric model of two-stage hydraulic turbine
图 1. 两级液力透平的三维几何模型

2.2. 网格划分与无关性分析

相比于单流道周期性网格，全流道的非周期性网格更加接近真实，但网格数量大大增加，计算时间也就更长。为提高计算效率，文中选用单流道周期性网格进行网格无关性分析。

为了更加高效地得到单流道周期性高质量网格，叶轮和导叶部分的网格采用 TurboGrid 软件划分，蜗壳部分的网格采用 Fluent Meshing 划分。在网格类型选择上，相比于非结构网格，结构网格需要手动设置调节，但其生成速度快，质量高，在计算结果的收敛性上也更有优势。同时，与蜗壳部分相比，叶轮旋转部分的流动特性捕捉要求更高的网格质量。因此，除蜗壳部分采用非结构四面体网格，其余各过流部件均采用结构六面体网格划分，如图 2 所示，其中在两级叶轮出口和中间导叶入口处分别划分出计算域，以保证计算结果的精确性。



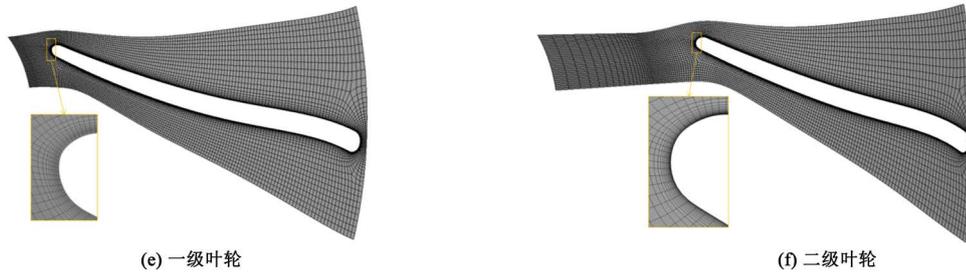


Figure 2. Single-channel grid of two-stage hydraulic turbine
图 2. 两级液力透平的单流道网格

为了尽可能降低网格数目对计算结果的影响,用 4 套不同数目的网格对液力透平的整个计算区域进行网格无关性分析。分析过程中,蜗壳部分网格数保持不变,利用 ANSYS CFX 软件对 4 套网格进行标准流量工况非空化条件下的定常计算。

4 套网格各过流部件具体情况和计算结果如表 2 和图 3 所示。其中,由于中间导叶部分存在 180°的大角度转角,在网格数过少情况下无法保证网格完全贴合模型表面,从而无法保证网格质量和计算结果可靠性,因此在网格 1 中沿用网格 2 的中间导叶部分网格。

Table 2. Mesh independence verification
表 2. 网格无关性分析

	过流部件	网格 1	网格 2	网格 3	网格 4
网格	蜗壳	3.69×10^5	3.69×10^5	3.69×10^5	3.69×10^5
	一级导叶	1.94×10^5	2.85×10^5	3.69×10^5	5.07×10^5
	一级叶轮	1.94×10^5	2.20×10^5	2.42×10^5	3.48×10^5
	中间导叶	1.00×10^5	1.00×10^5	1.02×10^5	2.70×10^5
	二级导叶	2.02×10^5	2.86×10^5	3.72×10^5	4.57×10^5
	二级叶轮	1.47×10^5	2.19×10^5	2.99×10^5	2.68×10^5
	总计	1.20×10^6	1.48×10^6	1.75×10^6	2.22×10^6
	结果	扬程 H/m	286.302	288.126	288.989
效率 η		0.71669	0.71985	0.71842	0.71955

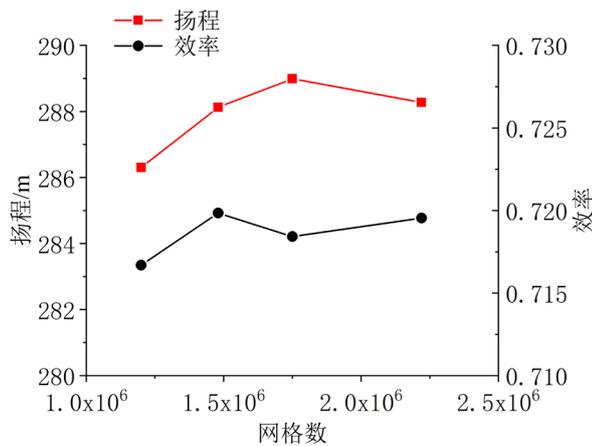


Figure 3. Mesh independence verification results
图 3. 网格无关性验证结果

结果表明,从网格 2 开始计算结果趋于稳定,且网格 3 和网格 4 的结果相差不超过 0.3%,因此本文选用网格 3 进行计算分析。

2.3. 数值计算方法

传统 CFD 计算软件 ANSYS CFX 在流体问题学术研究上已有广泛应用,而国内自主研发的 Turbo Tides 作为流体机械专业软件,同样具有 CFD 数值计算功能,文中在这两个数值计算平台上分别对液力透平进行计算,以此分析 Turbo Tides 软件在液力透平正向设计和 CFD 数值计算上的可靠性。

利用网格 3 分别在 ANSYS CFX 和 Turbo Tides 两个仿真平台上进行数值计算。CFX 中选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,边界条件采用 16.5 MPa 定压入口,出口设置质量流量出口,取标准流量工况 $Q_d = 15.3 \text{ kg/s}$,叶轮域设置为旋转域,转速为 -2985 r/min ,考虑到透平叶轮旋转方向和工质流向与泵工况下相反,因此取负号。将除蜗壳外各过流部件两侧边界分别单独设置为 Rotational Periodicity,即周期性边界,以实现单流道的模拟计算。此外,将蜗壳至一级导叶和中间导叶至二级导叶交界面设置为 General Connection,其他交界面均设置为 Frozen Rotor 类型。Turbo Tides 的 CFD 模块采用有限体积法,离散格式为二阶迎风离散化,同样采用定压入口,质量流量出口,选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,轮盖设置为随转子转动。此外,为加速收敛,将求解器松弛因子设置为 1。

同时,为对单流道周期性网格计算结果进行验证,将单流道周期性网格旋转得到对应的全流道非周期性网格在 CFX 中进行计算。基于上述的数值计算方法设置,在 Turbo Tides 上选取 $0.3\sim 1.4 Q_d$ 12 个流量工况点对单流道周期性网格进行模拟计算,在 CFX 上选取相同流量工况点对单流道周期性网格和全流道非周期性网格进行模拟计算。

在工程实际运行中发现,透平无法避免工质含气的问题,为研究气液两相流动对液力透平的影响,在 CFX 周期性边界网格的基础上设置边界条件为 16.5 MPa 定压入口, $Q_d = 15.3 \text{ kg/s}$ 质量流量出口,在入口工质中加入空气,其体积分数设为 5%,分别选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Dispersed Phase Zero 模型作为液相和气相的湍流模型,以 Particle 模型为多相流模型。

3. 计算结果与分析

对周期性边界网格和全流道网格计算结果进行比较分析,研究其对液力透平工作性能的影响。并以该透平为对象,进行了多级液力透平气液两相流问题的初步探究。

3.1. 周期性边界与全流道计算对比

图 4 为 CFX 单流道周期性网格、全流道非周期性网格以及 TurboTides 单流道周期性网格计算结果外特性曲线的对比。在扬程上,三者计算结果在 $0.3\sim 0.6 Q_d$ 小流量工况点下非常接近,随着流量的增大,CFX 单流道计算结果与全流道计算结果开始产生明显差异,而 TurboTides 单流道计算结果始终与其保持较好的吻合性。功率上,三者计算结果相当接近,误差较小。效率上,三者计算结果较为接近,但在 $0.3 Q_d$ 和 $0.4 Q_d$ 两个小流量工况点下, TurboTides 单流道计算结果与 CFX 全流道网格计算结果的误差远小于 CFX 单流道计算结果与全流道计算结果的误差。综合来看,在主要运行工况下和误差允许范围内,采用 TurboTides 的单流道周期性网格计算的精确性不亚于 CFX 的全流道计算结果,同时考虑 TurboTides 的单流道计算更加节省计算资源和时间,因此在一般工程设计中采用 TurboTides 进行液力透平的计算是有较大的优势和应用前景的。

3.2. 透平内部空化与气液两相问题

以该透平为对象,进行气液两相流问题的初步探究。在工质含气 5% 的条件下进行计算,计算结果中

的气相分布云图如图 5 所示，发现气体聚集在蜗壳进口管部分，无法进入透平内部。

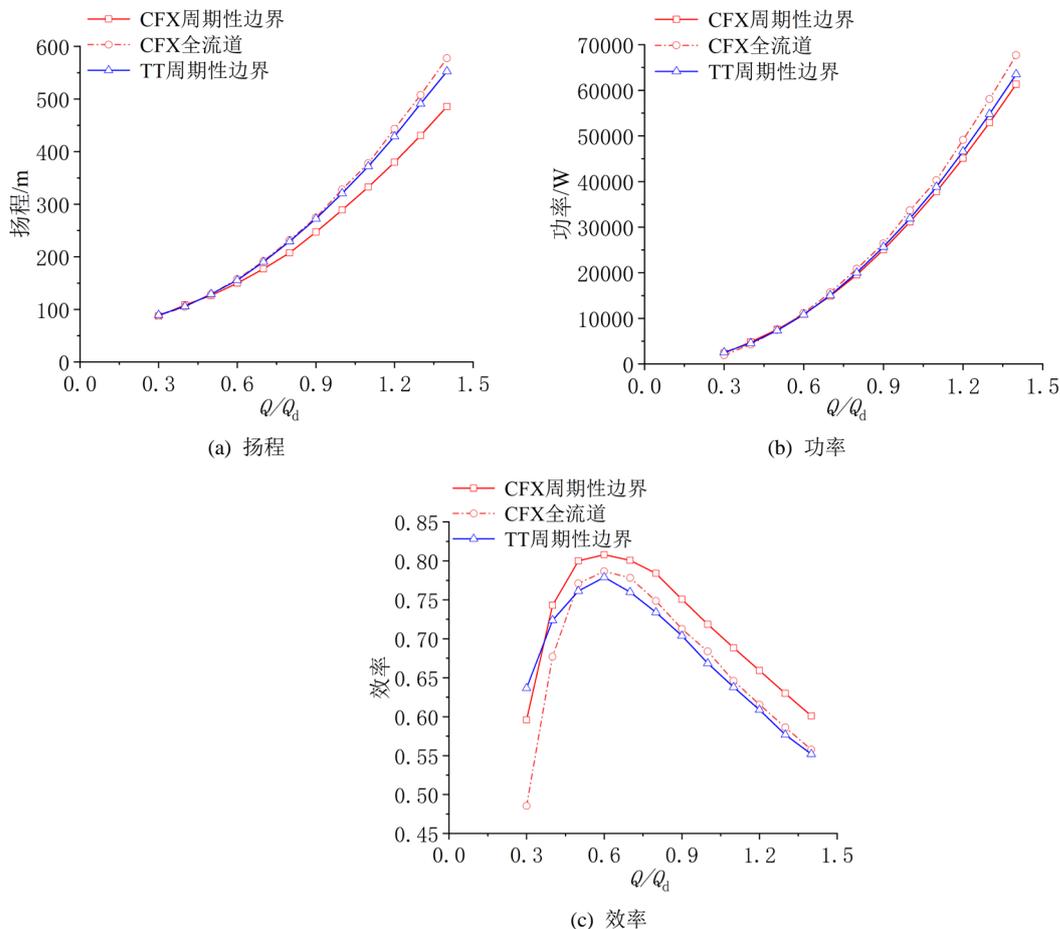


Figure 4. Performance curves between periodic boundary and full channel grids under different flow rate. Note: TT stands for TurboTides; Q is flow rate through the turbine; Q_d is design flow rate of the turbine

图 4. 周期性边界与全流道网格在不同流量下外特性曲线。注：TT 代指 TurboTides， Q 为通过透平的流量， Q_d 为透平的设计流量

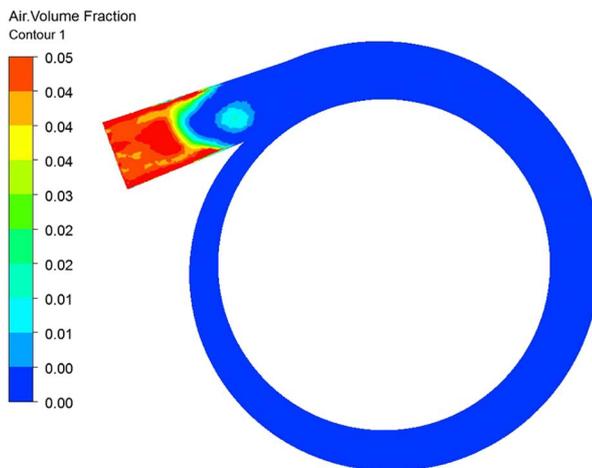


Figure 5. Contour of 5% air distribution

图 5. 含气 5% 气相分布云图

为进一步探究多级液力透平内部空化与气液两相问题的关系,在标准流量入口的条件下,设置压力出口且将出口静压降低到 0.3 atm,在工质水中加入水蒸气,进口处水蒸气的体积分数为 0,选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, Mixture 多相流模型和 Rayleigh-Plesset 汽蚀模型进行仿真计算,发现工质汽化发生在透平二级叶轮靠近出口处,如图 6 所示。

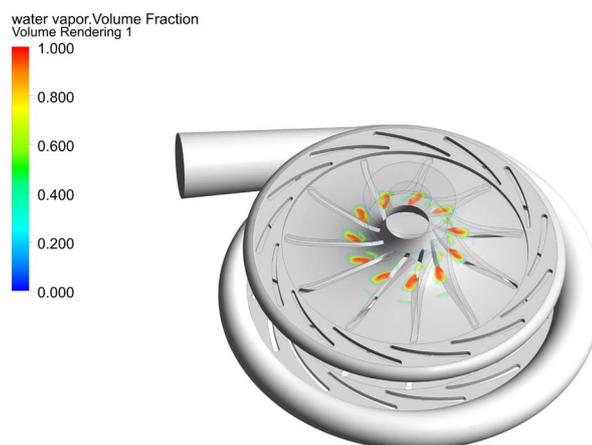


Figure 6. Water vapor volume distribution under cavitation
图 6. 汽化条件下气相体积分布图

由此初步推测,该两级液力透平靠近出口工作级的低压区易发生工质汽化导致气液两相流动。因此对于多级液力透平,其内部低压区的工质汽化有可能是其气液两相流动发生的主要原因之一。

4. 结论

本文以我国自主研发 TurboTides 正向设计的液力透平模型为对象,分别在 TurboTides 和 CFX 中进行数值计算,初步验证了 TurboTides 在液力透平正向设计和 CFD 数值计算上的可靠性。并以该透平模型为对象,进行气液两相流问题的初步探究。通过对该两级液力透平气液两相流问题的研究,分析表明文中两级液力透平靠近出口工作级的低压区当进口压力持续降低时,最易发生工质汽化导致气液两相流动。对于多级液力透平,其内部低压区的工质汽化有可能是其气液两相流动发生的主要原因之一。后期可同时考虑工质的可压缩性,进一步深入研究气液两相流动和工质可压缩性对透平内部流场压力脉动的影响。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51976125); 国家重点研发项目课题(2017YFC0806604)。

参考文献

- [1] 孔繁余, 陈凯, 杨孙圣, 汪家琼, 袁昕. 泵作透平性能试验台设计开发[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(5): 387-390+428.
- [2] 吴玉珍, 王铭. 液力透平的直接正向设计方法[J]. 化工设备与管道, 2019, 56(3): 38-42+77.
- [3] Zhang, R.H., Guo, R., Yang, J.H. and Luo, J.-Q. (2017) Inverse Method of Centrifugal Pump Impeller Based on Proper Orthogonal Decomposition (POD) Method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **30**, 1025-1031. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0137-x>
- [4] Binama, M., Su, W., Li, X., Li, F.-C. and Wei, X.-Z. (2017) Investigation on Pump as Turbine (PAT) Technical Aspects for Micro Hydropower Schemes: A State-of-the-Art Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **79**, 148-179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.071>
- [5] Kaunda, C.S., Kimambo, C.Z. and Nielsen, T.K. (2014) A Technical Discussion on Microhydropower Technology and

- Its Turbines. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **35**, 445-459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.035>
- [6] Nautiyal, H., Varun and Kumar, A. (2010) Reverse Running Pumps Analytical, Experimental and Computational Study: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2059-2067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.006>
- [7] 王桃, 孔繁余, 何玉洋, 杨孙圣. 离心泵作透平的研究现状[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 674-680.
- [8] 王晓晖, 杨军虎, 史凤霞. 能量回收液力透平的研究现状及展望[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(9): 742-747.
- [9] 杨军虎, 张雪宁, 王晓晖, 孙庆冲, 张建华. 能量回收液力透平研究综述[J]. 流体机械, 2011, 39(6): 29-33.
- [10] 刘玉莹. 水力透平转轮的水力设计方法研究及其内部流动的模拟[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [11] 王键. 基于叶片载荷分布的离心压缩机叶轮设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [12] 陶丽桦, 王键, 刘艳, 刘啸. 叶片载荷分布对离心叶轮气动性能影响的数值研究[J]. 风机技术, 2015, 57(6): 13-20+92.
- [13] Yang, W., Liu, B. and Xiao, R. (2019) Three-Dimensional Inverse Design Method for Hydraulic Machinery. *Energies*, **12**, Article No. 3210. <https://doi.org/10.3390/en12173210>
- [14] 赵万勇, 王磊, 赵爽, 王钊, 杨登峰. 基于 CFD 的中高比转速离心泵叶轮的设计方法[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(2): 35-38.
- [15] Lu, Y.-M., Wang, X.-F., Wang, W. and Zhou, F.-M. (2018) Application of the Modified Inverse Design Method in the Optimization of the Runner Blade of a Mixed-Flow Pump. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **31**, Article No. 105. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0302-x>
- [16] Leguizamón, S. and Avellan, F. (2020) Open-Source Implementation and Validation of a 3D Inverse Design Method for Francis Turbine Runners. *Energies*, **13**, Article No. 2020. <https://doi.org/10.3390/en13082020>
- [17] 刘莹莹, 杨孙圣, 孔繁余, 王桃, 陈凯. 前弯型叶片液力透平的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(1): 21-27.
- [18] Krzemianowski, Z. (2019) Engineering Design of the Low-Head Kaplan Hydraulic Turbine Blades Using the Inverse Problem Method. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, **67**, 1133-1147.
- [19] 吴子娟, 梁武科, 董玮, 高晨辉, 陈帝伊. 转轮下环间隙对混流式水轮机内部流动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 23-29+337.
- [20] 杨孙圣, 戴韬, 陈振, 邵珂, 王凯. 蜗壳出口倾斜对混流泵作透平的性能影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(5): 451-456.
- [21] 苗森春, 杨军虎, 王晓晖, 等. 不同转速下液体透平的性能研究[J]. 流体机械, 2017, 45(10): 7-11.