

可逆式水轮机变工况研究*

李琪飞, 李仁年, 黄 祺, 吕文娟, 郭树熊

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对抽水蓄能电站稳定性的要求,利用可逆式水轮机水泵工况断电过程中蜗壳出水边的压力始终保持恒定(水轮机工况的水头),机组转速连续变化这一规律,根据转速的不同来选取不同的工况点。在 Fluent 软件中,通过变换转轮的边界条件设置,可模拟可逆式水轮机水泵断电过程不同工况点水力变化,计算时采用雷诺时均方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,压力和速度耦合采用半隐式(SIMPLEC)算法。对可逆式水轮机不同工况点模拟结果进行了分析总结,数值试验结果直观地反映了可逆式水轮机水泵工况断电的不同工况点、叶片表面的压力分布、蜗壳内部的流场漩涡分布、水力损失等,对可逆式水轮机的转轮设计和结构优化有一定的应用价值。

关键词:可逆式水轮机;数值模拟;结构优化;SIMPLEC 算法

中图分类号:TK 05 **文献标志码:**A

Research on Variable Work Conditions of Pump Turbine

LI Qifei, LI Rennian, HUANG Qi, LV Wenjuan, GUO Shuxiong

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: According to the disciplinary of pressure of yielding water on the volute keeps constant(the head of work condition for the hydraulic generator) and the generator unit continually changes during the transition from electricity goes off at pump working for the pump-turbine, the different work conditions can be chose with the difference of rotation speed in light of the requirement of transient process of pumped-storage hydroplant. The rotation set-up of the runner was changed in the software of Fluent, and finally the purpose of imitating the changes of waterpower in the different work conditions during transition stage for the reversible turbine can be realized. The Reynolds time averaged equation and RNG $k-\epsilon$ turbulence mode were used in the calculations. The implicit(SIMPLEC) method was used for the coupling of pressure and velocity. The imitation results for different work conditions for the reversible turbine were analyzed and concluded in details. The results directly indicated that the pressure distribution on the blade surface, flow-field swirl distribution in the volute, and the hydraulic loss during the transition from electricity goes off at pump working for the pump-turbine. It is applied valuable for the runner design and structure optimization of pump-turbine.

Key words: pump turbine, numerical simulation, structure optimization, SIMPLEC algorithm

可逆式水轮机不同工况点水力性能的优劣将决定抽水蓄能电站的稳定性,在一定程度上限制了蓄能电站的参数和规模。可逆式水轮机完整的工况包括水泵工况启动、水泵工况正常停机、水泵功率的增加或减少、水泵工况事故断电、从水泵工况转换到水轮机工况、从水轮机工况转换到水泵工况、从水泵工况转换到调相工况^[1]。为了便于试验,选取水泵工况断电过程作为研究对象。Fluent 基于三维模型流场分析的准确性得到了广泛认可^[2-5],但是应用在计算过渡工况方面的相关文献甚少。本文利用 Fluent 软件并改变转轮的边界条件,基于雷诺时均方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,对压力和速度耦合采用半隐式(SIMPLEC)算法,分析了可逆式水轮机水泵工况断电过程不同工况点的水力特性,对可逆机其他工况点压力突变的定量分析有一定的参考作用。

1 模型建立以及网格划分

1.1 模型建立

模型是基于同比转速混流式水轮机的叶片设计原理^[6],对 1 个给定参数的可逆式水轮机进行水力设计、三维造型、网格划分,并通过数值模拟,反复修正得到的。可逆式水轮机模型部分设计参数见表 1,转轮模型如图 1 所示。

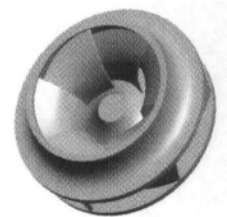


图 1 转轮三维模型

表 1 模型部分设计参数

工况	流量 /m ³ ·h	水头 扬程/m	转速 /r·min ⁻¹	导叶高度 /mm	叶片数 /个
水轮机	3 240	203.8	500	66.72	6
水泵	2 880	204	600	66.72	6

1.2 网格划分

由于实现了 ICEM 中四面体网格生成的自动化,系统可自动对已有的几何模型生成拓扑结构,最终还可以对网格的质量进行检查和修改。鉴于以上优点,采用了 ICEM 四面体结构化网格生成技术,整机生成计算域网格数见表 2,生成计算域网格图如图 2 所示。

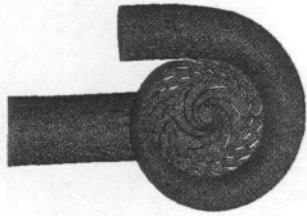


图 2 可逆式水轮机计算域网格图

表 2 可逆式水轮机网格数

	蜗壳	转轮	尾水管
网格数/个	657 372	180 532	255 703

2 控制方程及边界条件

2.1 控制方程

本文计算的可逆式水轮机转速为 500 r/min 左右,转速较高,易出现强旋度及旋转剪切流等现象;同时,在 RNG $k-\epsilon$ 模型计算过程中考虑了旋转效应,对强旋转流动计算的精度较高,故采用 RNG $k-\epsilon$ 模型。RNG $k-\epsilon$ 模型是由 Yakhot 和 Orszag 于 1986 年提出的,它是对标准 $k-\epsilon$ 模型的修正形式。

修正后的 k 和 ϵ 的运输方程分别为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中, $C_{\epsilon 2}^* = C_{\epsilon 2} + \frac{C_u \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$, 各湍流模型常数分别为: $C_u = 0.0845$; $C_{\epsilon 1} = 1.42$; $C_{\epsilon 2} = 1.68$; $\sigma_k = 0.72$ 。

由于考虑了 RNG $k-\epsilon$ 模型高应变率和大曲率过流面等因素的影响,从而提高了模型在旋流和大曲率情况下的精度。对离散方程的压力-速度耦合的处理采用压力耦合方程组的半隐式(SIMPLEC)算法。

2.2 边界条件

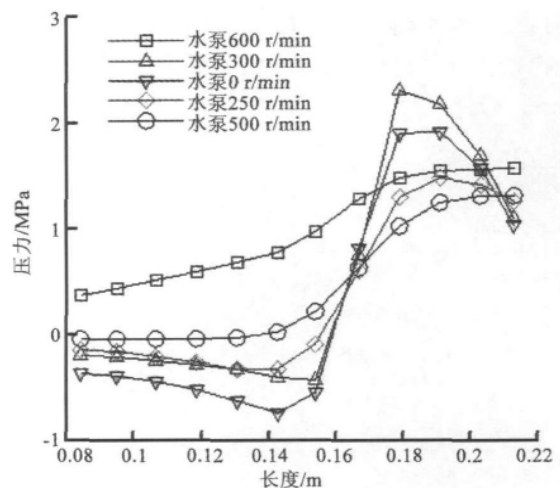
Fluent 软件因其直观的分析方法,得到广泛的应用。因可逆式水轮机经历水泵工况断电^[7]过程,蜗壳出水边的压力始终保持恒定(水轮机工况的水头);所以,水轮机工况采用压力进口、压力出口边界

条件,水泵工况反之。壁面满足无滑移固壁条件,采用标准壁面函数法。

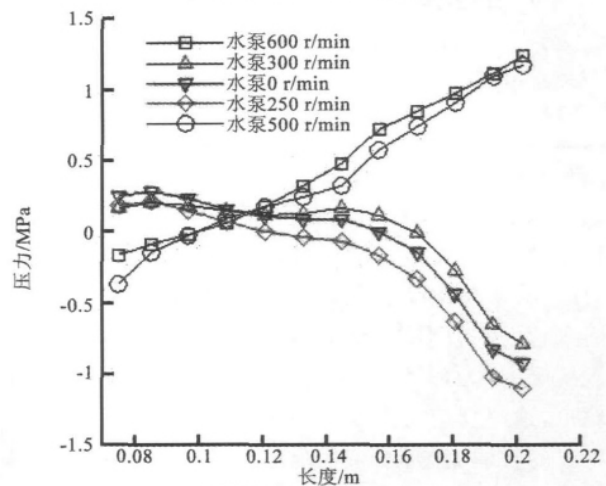
3 计算结果及分析

3.1 不同工况下叶片表面的压力分布

叶片表面的压力分布对于水力机械的效率、汽蚀以及工作的稳定性都有直接的影响^[8-10]。可逆式水轮机不同工况点叶片压力分布如图 3 所示。由图 3 可以看出,压力分布在水泵设计工况(600 r/min)和水轮机设计工况(500 r/min)良好,叶片工作面的压力均高于背面的压力,有利于叶片的水力利用,过渡过程不同的工况点压力突变集中在叶片进口边的 2/54/5 处,且变化剧烈。这是由于可逆式水轮机叶片较长,弯曲大,在过渡工况时流体扩散不均匀,造成工作面脱流,压力不均所致。



a) 叶片工作面不同工况点的压力分布



b) 叶片背面不同工况点的压力分布

图 3 可逆式水轮机不同工况点叶片压力分布 (横坐标以转轮中轴线作为 0 起点)

3.2 蜗壳内部漩涡的分布

蜗壳内部流线分布的优劣能够很好地反映液流沿圆周的均匀供给、局部损失和沿程损失等方面的

问题。由图4可以看出,在水泵设计工况(见图4a),流线分布比较平滑,没有明显的漩涡;大的漩涡出现在水泵工况断电之后的瞬间(见图4b);随着水泵工况转速的减小,漩涡数量也逐渐减少(见图4c、图4d)。

漩涡最初产生在蜗壳舌端,最后逐渐由导叶进水边向导叶出水边延伸,在进入水轮机工况时漩涡大幅减少,在过渡过程不同工况点,蜗壳内部流动紊乱程度大,二次流、漩涡、流动分离等现象比较严重。这些现象可以说明,在水泵工况断电后,流体惯性消失随即反灌,转轮由于机械惯性继续旋转,反灌流体和转轮惯性在蜗壳中形成大的漩涡;随着转速的下降,转轮中出流减小,漩涡向导叶出水边偏移,水轮机设计工况时漩涡主要是由于水流撞击蜗壳壁产生的,在达到水轮机设计工况时,流线趋于平滑。不同工况点的压力变化及损失情况见表3。

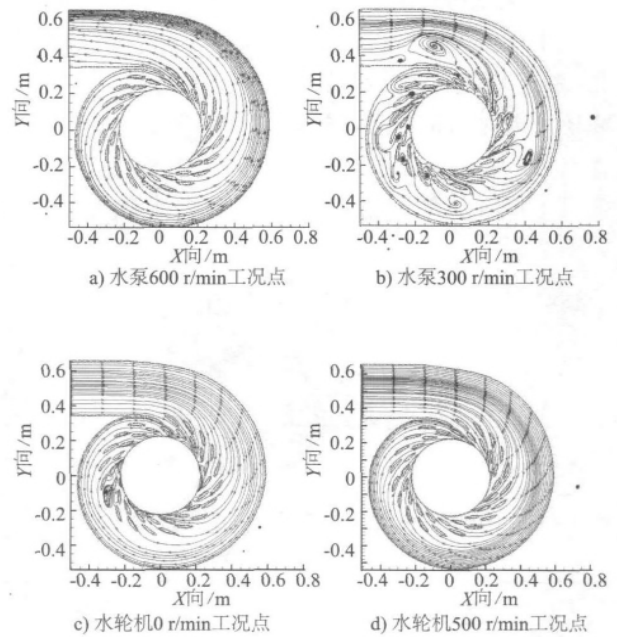


图4 可逆式水轮机不同工况点蜗壳流线分布

表3 可逆式水轮机不同工况点的压力分布

转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	蜗壳进口 总压/Pa	蜗壳(导叶) 出口总压/Pa	尾水管进口 总压/Pa	尾水管出口 总压/Pa	蜗壳水力 损失/Pa	转轮能量利用 (或能量提升)/Pa	尾水管压力 损失/Pa	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	效率/(%)
600	2 000 703	2 189 654	45 270	101 325	188 951	2 144 384	56 055	0.80	82
480	2 000 687	1 898 696	45 483	101 325	101 991	1 853 213	55 842	0.37	—
300	2 000 648	1 896 852	49 851	101 325	103 796	1 847 001	51 474	-0.10	—
240	2 000 646	1 889 376	52 800	101 325	111 270	1 836 576	48 525	-0.32	—
120	2 000 637	1 868 654	58 045	101 325	131 983	1 810 609	43 280	-0.55	—
0	2 000 628	1 934 470	63 565	3 163	66 158	1 870 905	60 402	-0.68	0
-120	2 000 628	1 959 411	19 286	3 503	41 217	1 940 125	15 783	-0.70	57
-250	2 000 628	1 964 456	18 045	4 120	36 172	1 946 411	13 925	-0.79	75
-360	2 000 628	1 967 672	17 838	4 741	32 956	1 949 834	13 097	-0.84	88
-500	2 000 628	1 971 661	16 608	5 253	28 967	1 955 053	11 355	-0.9	91

3.3 可逆机水力损失分析

由表3可以看出,在使可逆式水轮机进入反灌状态时,带有大冲角的扩散叶栅绕流导致转轮上压力巨变,水泵工况水力损失严重,不同工况点蜗壳和尾水管的水力损失随着转速的减小逐渐降低,水轮机工况的水力损失相对于水泵工况和过渡工况整体较少,这与复杂的流场有一定的关系;另外,水轮机工况的收缩流场,水泵工况的扩散流场也是造成这一现象的主要原因。可逆式水轮机中存在空化与磨损现象,对于可逆式水轮机空化与磨损模型的建立、流动分析理论方面的工作研究还将继续。

4 结语

可逆式水轮机变工况点,叶片进口边 $2/5 \sim 4/5$ 处压力突变剧烈,更容易引起空化空蚀,从而影响叶

片的寿命,在设计过程中应重点加以考虑。

水泵工况断电之后,蜗壳内部压力变化明显,流动情况复杂,漩涡强度大,变化剧烈,受冲击严重。设计时可以适当增加导叶的相对高度,放宽设计参数。

可逆式水轮机进入倒灌状态后,带有大冲角的扩散叶栅绕流,造成了旋转脱流,从而产生转轮上的动水作用力,转轮轴对称速度场被破坏,能够导致很大的径向力,对机组的破坏性较大。

参考文献

- [1] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 王福军,黎耀军,王文娥,等. 水泵CFD应用中的若干问题与思考[J]. 排灌机械,2005,23(5):1-10.

基于磁场三维动态导磁球上的磁性液体行为研究*

孙 峤¹, 吴 鹏²

(1. 大连大学 建筑工程学院 纳米磁性液体研发工作室, 辽宁 大连 116622;
2. 大连大学 物理科学与技术学院 纳米磁性液体研发工作室, 辽宁 大连 116622)

摘 要:利用自行搭建的磁场三维动态展示装置,通过调控电磁铁的励磁电流,进行磁场三维动态实心导磁球上磁性液体的行为研究。观察实心导磁球处于不同磁场下,三维立体磁感线的展示效果及其磁性液体突起三维尖峰的数目、间距、高度,探索分析这些参数与磁场间的变化规律,以期进一步拓展磁性液体的应用。

关键词:磁性液体;磁场展示;实心导磁球;三维尖峰

中图分类号:TM 271 **文献标志码:**A

Research on Behavior of Magnetic Field based on Three-dimensional Dynamic Magnetic Ball

SUN Qiao¹, WU Peng²

(1. Civil and Architecture College, Dalian University, Dalian 116622, China;
2. College of Physical Science and Technology, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Through changing the excitation current of electromagnet, this paper used self-produced three-dimensional dynamic apparatus to investigate the behavior of magnetic fluids. Three-dimensional magnetic induction lines can be observed more clearly under different solid magnetic ball fields. Based on the analysis of the inter-relationships between magnetic field and three-dimensional spikes, in terms of number, interval and height, the further application of magnetic liquid can be enhanced.

Key words: magnetic fluid, magnetic field display, solid magnetic ball, three-dimensional spikes

磁体周围有一种看不见、摸不着,但客观存在的磁场。以往人们通过小磁针的偏转,铁屑有规律的分

布来证实磁场的存在和强弱。但小磁针的偏转不能让人整体上把握磁场的空间分布;铁屑有规律的分

- [3] 李琪飞,李仁年,敏政,等. 水轮机 PID 调速器最佳参数整定及寻最优计算方法[J]. 排灌机械,2006,24(4):33-36.
- [4] 罗伟文,郑时雄,黄振峰,等. 混流式水轮机转轮叶片裂纹故障及其原因分析[J]. 新技术新工艺,2006(9):28-30.
- [5] Samuel M C. Instability of pump-turbines with s-shaped characteristics[A]. The hydraulic machinery and systems 20th IAHR symposium [C]. Charlotte, North Carolina, USA:IAHR, 2000.
- [6]. Hellstroem J. Parallel CFD simulations of an original and redesigned hydraulic turbine draft tube[J]. Advances in Engineering Software, 2007,38(5):338-344.
- [7] 严敬,潘光玉,阚能琪. 低比转速叶轮叶片数的选择原则[J]. 排灌机械,2008,26(1):18-20.
- [8] 杨琳,陈乃祥. 水泵水轮机全特性与蓄能电站过渡过程

- 的相关性分析[J]. 清华大学学报,2003,43(10):34-37.
- [9] 肖若富,王正伟,罗永要. 基于流固耦合的混流式水轮机转轮静应力特性分析[J]. 水力发电学报,2007,26(3):120-123.
- [10] Yan J. A new way of plotting cylindrical blade[J]. Journal of Power of Energy:Part A,1990,204(4):277-280.
- * 国家自然科学基金资助项目(51079066)

作者简介:李琪飞(1975-),男,副教授,主要从事水力机械固液两相流理论及应用方面的研究。

通信作者:黄祺

收稿日期:2012年08月30日

责任编辑 李思文