

尾水管深度对轴流定桨式水轮机性能的影响

杨静¹ 宋华婷² 黄智达³ 刘健² 王正伟¹

(1. 清华大学热能系, 北京 100084; 2. 新华水力发电有限公司, 北京 100070;

3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

摘要: 尾水管深度对水轮机的效率及稳定性都有重要影响。为解决某电站水轮机效率及出力不足的问题, 采用数值模拟的方法, 分析了尾水管深度变化对水轮机性能的影响。通过几个不同尾水管加深方案的比较分析, 得出尾水管深度在一定范围内增加能有效提高尾水管回能系数, 降低扩散损失。但由于沿程摩擦损失会随深度增加而增大, 因而综合考虑损失、效率及经济性因素, 最终选定尾水管深度为 $3.0D_1$ 的尾水管深度方案。同时, 为保证水轮机的运行稳定性, 也比较了该方案对流场稳定性的影响, 分析了湍动能及脉动的变化。结果表明尾水管与转轮内流场存在相互作用, 直锥段加高后不但会降低直锥段出口的湍动能, 也会减轻转轮出口的湍动能。即尾水管内流动的改善也会降低转轮出口附近流场的紊乱程度, 显著降低了转轮所受到的径向力及压力脉动峰值, 提升了转轮内流场的稳定性。此外尾水管深度改变方案对转轮空化性能的影响不大, 转轮叶片背面的最低压力范围基本没有变化。

关键词: 轴流定桨式水轮机; 尾水管深度; 回能系数; 损失分析; 数值模拟

中图分类号: TK730.3⁺14; TK733⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0045-06

Effect of Draft Tube Depth on Performance of Axial Flow Fixed-blade Turbine

Yang Jing¹ Song Huating² Huang Zhida³ Liu Jian² Wang Zhengwei¹

(1. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Xinhua Hydropower Company Limited, Beijing 100070, China

3. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The performance of draft tube plays an important role in the efficiency and stability of hydraulic turbine. To improve the hydraulic performance of an axial flow fixed-blade hydro-turbine, the depth of draft tube was studied by changing the draft tube cone height using numerical simulation. Three different modified cases of draft tube depth were conducted and analyzed. The results showed that the recovery coefficients and the diffusion losses of draft tube were increased with its depth increasing within limits. However, the friction losses were decreased with it. Thus, the draft tube depth of $3.0D_1$ was chosen as the initial scheme by comprehensive consideration of the efficiency and economic factors. Besides, the turbulence kinetic energy, pressure fluctuations and force components acting on the runner were compared to judge the effect of draft tube depth on stability. The results showed that the increase of depth was favorable for the flow field stability at rated conditions. The turbulence kinetic energy at both the inlet and outlet of the cone was reduced with the heightening of draft tube cone, which also proved the flow field interaction between the draft tube and runner. The flow improvement in draft tube would in turn reduce the disturbance to runner outlet, which also explained the decreases of the peak to peak value and

收稿日期: 2015-06-05 修回日期: 2015-09-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51439002)和中国博士后基金项目(2015M571046)

作者简介: 杨静(1985—), 女, 博士后, 主要从事流体机械设计分析研究, E-mail: yangjing2014@tsinghua.edu.cn

通信作者: 王正伟(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械安全高效运行分析研究, E-mail: wzw@mail.tsinghua.edu.cn

force components in runner. The areas lower than the critical cavitation pressure on the suction side of blades was almost unchanged compared with the original draft tube.

Key words: axial flow fixed-blade turbine; draft tube depth; recovery coefficient; loss analysis; numerical simulation

引言

对于中低水头电站的水轮机而言,由于总能量有限,从转轮出口进入尾水管的动能在总能量中所占的比重较大,因而尾水管的性能对水轮机的效率和稳定性起着重要的作用^[1]。理论上认为转轮出口的有旋流是引起尾水管损失的主要因素^[2],因而在对老电站进行增容改造的过程中,通常只更换转轮。实际上仅改变转轮对尾水管内流场的提高是有限的,合理设计尾水管也是提高其效率的重要方面^[3-6]。

尾水管深度是指尾水管底板平面至导水机构底环平面的距离。尾水管的几何参数对水力性能的影响很早就得到了研究人员的重视,尾水管深度不足很容易造成转轮下游流动紊乱^[7]。尾水管锥角较大时强烈的压力梯度将导致边界层变厚,引起流动分离。而在弯肘部位主流快速地从垂直转为水平方向,会形成强烈的二次流^[8],且在偏工况不稳定的现象可能会进一步加剧^[9-10]。特别是对于轴流定桨式水轮机而言,由于桨叶不能调节很容易产生涡带和振动,而通过合理设计尾水管深度可对此进行改善,因而定桨式水轮机更加适合选用深度较大的尾水管^[11]。

虽然适当增加尾水管深度将导致开挖量增加,但也有助于提高其恢复系数,水力效率会有所增加。从长远收益来看,这对实现改造机组的稳定性和效率的有效提升是有利的^[12]。为定量分析尾水管深度的影响,本文研究尾水管深度变化对水轮机流场损失、效率、出力、湍动能和压力脉动的影响。

1 尾水管修改方案设置

在对某电站的轴流定桨式水轮机(模型如图1所示)进行增容改造的过程中发现,即使采用了高效率的新设计转轮,水轮机效率依然不高。该电站的轴流定桨式水轮机转轮直径 $D_1 = 2.7$ m,额定水头为16 m,最低水头12 m。经不同过流部件的损失分析发现:运行范围内尾水管的水力损失较大是整机效率较低的主要原因。原尾水管深度为 $2.56D_1$,单边锥角高达 13° 。尾水管模型从目前的设计标准来看,其直锥段的高度偏低,且单边锥角偏大,这很容易导致肘管进口的速度较高,即使更换了水力性

能很好的转轮,依然无法避免流动分离和较高的流动损失^[13]。因此经讨论最终决定通过改变直锥段高度来调整尾水管深度,以此来达到提高水力性能的目的。尾水管深度的变化通过进一步增大挖深量、降低尾水管底板的高度来实现,图1b所示为修改方案。为保证修改尾水管深度后,流场的水力性能和稳定性最优,采用数值模拟分析的方法对不同尾水管深度的流场进行了研究。

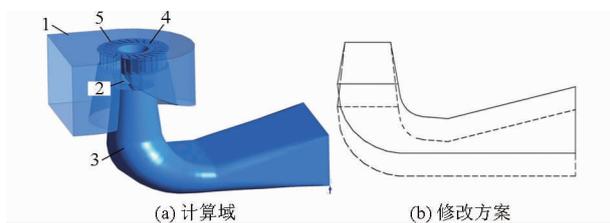


图1 水轮机的流道计算域及修改方案

Fig. 1 Flow passage model and modification scheme

1.蜗壳 2.转轮 3.尾水管 4.活动导叶 5.固定导叶

根据尾水管深度的限制要求,保证转轮出口直径不变,分别设置尾水管深度为 $2.8D_1$ 、 $3.0D_1$ 和 $3.15D_1$ 3种不同的深度变化方案进行流场分析。比较尾水管深度变化对流场水力性能、稳定性及空化3个方面的影响。

2 数值计算方法

数值计算方法中边界条件的准确设置是计算准确的前提,尽管本文的分析对象是尾水管,但已有研究表明,即使按照转轮出口速度分量及湍流参数给定尾水管进口边界条件,仅选择尾水管模型进行数值模拟,依然会产生明显的误差^[14-15]。因此本文选取了轴流定桨式水轮机整体流道作为计算域,将计算域分为蜗壳和固定导叶段、活动导叶段、转轮段以及尾水管段5部分,如图1所示。对于旋转部件与静止部件之间的动静交界面,选择冰冻转子的方式处理交界面之间的数据传递。网格划分过程中,对蜗壳和固定导叶采用非结构化四面体同位网格,对活动导叶、转轮以及尾水管采用结构化六面体网格。最终的网格单元数约173万、计算节点133万,其中转轮域为77万节点,尾水管为32万节点。图2中给出了转轮及尾水管流域的网格。

进口边界条件根据水轮机的水头在蜗壳进口处采用总压进口,速度方向垂直蜗壳入口截面。在尾水管出口处边界条件给定静压为零。壁面采用无滑

移边界条件。非定常计算时步设置每步 1/200 圈。计算中采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。

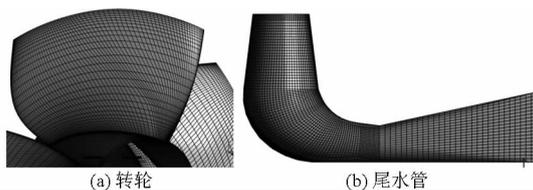


图2 转轮和尾水管网格

Fig. 2 Runner and draft tube meshes

3 水力性能分析

尾水管回能系数是评价尾水管性能的重要指标,尤其是对于低水头电站而言,提高尾水管回能系数对提升机组的出力及效率是非常有利的。回能系数主要由直锥段进、出口平均速度决定,因此依据提出的方案对尾水管深度进行修型时必须对该参数的变化进行分析。此外,在尾水管直锥段内,水力损失主要是沿程摩擦损失和壁面附近的分离扩散损失。对 2 种损失的定量分析也是提高水力性能的重要途径。基于此,本文首先从这 3 个因素分析尾水管内的能量变化:尾水管回能系数用 η_v 表示;沿程摩擦损失用 h_f 表示;分离扩散损失用 h_d 表示。这 3 个变量的计算公式为

$$h_f = \frac{\lambda}{8 \tan \frac{\theta}{2}} \frac{V_{in}^2 - V_{out}^2}{2g} \quad (1)$$

$$h_d = 3.2 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{1.25} \frac{(V_{in} - V_{out})^2}{2g} \quad (2)$$

$$\eta_v = \left(\frac{V_{in}^2 - V_{out}^2}{2g} - h_f - h_d \right) / \left(\frac{V_{in}^2}{2g} \right) \quad (3)$$

式中 λ ——摩擦阻力系数

V_{in} ——尾水管直锥段进口平均速度

V_{out} ——尾水管直锥段出口平均速度

θ ——尾水管单边锥角

g ——重力加速度

根据以上公式计算了不同尾水管方案的流场回能系数及能量损失,如图 3 所示。图中可以看出随着尾水管深度的增加,尾水管回能系数增大,但当尾水管深度超过 $2.8D_1$ 后回能系数的增大逐渐趋于平缓。2 种损失的变化略有不同,深度增加导致沿程摩擦损失和分离扩散损失产生线性变化。沿程损失线性增加,而尾水管锥管中的分离扩散损失线性降低。图中可以看到在尾水管深度接近为 $3.0D_1$ 时沿程摩擦损失和分离扩散损失出现相交,表明在该深度值时,2 种损失因素的综合影响最小,而且从图中可以看到该深度尾水管回能系数也较大,因此从这 3 个参数判断深度为 $3.0D_1$ 时水力性能最高。为进

一步判断结果,对不同方案下机组的性能参数及尾水管内的总压差水力损失也进行了分析,如表 1 所示。

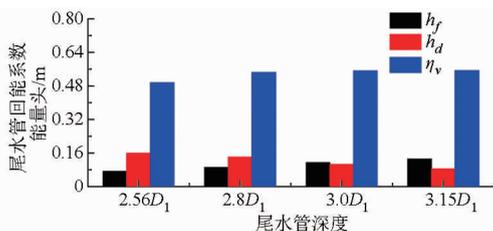


图3 尾水管的损失系数及回能系数变化

Fig. 3 Variations of loss and recovery coefficients

表1 水轮机性能随尾水管深度的变化

Tab. 1 Variations of hydraulic performance vs draft tube depth

参数	$2.56D_1$	$2.8D_1$	$3.0D_1$	$3.15D_1$
功率/MW	6.45	6.55	6.61	6.48
效率/%	87.63	88.67	89.27	87.88
尾水管损失/%	5.80	5.19	5.10	5.60
转轮损失/%	2.58	2.145	1.64	2.49

从表中数据可以看出,与前文一致,机组在尾水管深度为 $3.0D_1$ 时,效率及出力最高。从压差损失的结果来看,尾水管和转轮的损失在该深度下也最低。因此基本可以确定尾水管深度为 $3.0D_1$ 的方案为最佳方案。

除基本性能参数外,图 4 还给出了 4 种不同深度方案下尾水管内流场的流线图,以便进一步判断各方案的优劣。图中可以看到原尾水管深度下,尾水管内部流场流态非常差,可以清晰地看到边壁附近的分离扩散漩涡,以及尾水管内很大范围的中心漩涡和出口附近明显的回流漩涡,该尾水管内部紊乱的漩涡流动会极大地影响尾水管的性能。而随着锥管高度的增加,在 $3.0D_1$ 和 $3.15D_1$ 的 2 种深度下边壁分离漩涡基本消失。中心漩涡和回流漩涡的范围也逐渐减小,在高度最大时范围最小。可见,高度增加后尾水管内部流场逐渐趋于顺畅。基于以上分析,综合考虑水力性能、流态及开挖量 3 方面因素,基本选定尾水管深度为 $3.0D_1$ 的修改方案。

4 稳定性分析

为保证机组的高效稳定运行,仅从水力性能考虑是不够的,机组的稳定性也是设计者需要考虑的关键因素,因此针对初选的尾水管深度为 $3.0D_1$ 的方案与原尾水管方案进行了非定常计算,计算中记录了流道典型位置处的压力脉动及转轮所受到的力分量的周期性变化,通过对压力脉动及转轮所受到的径向力 (F_x, F_y) 以及轴向力 F_z 的变化来判断尾水

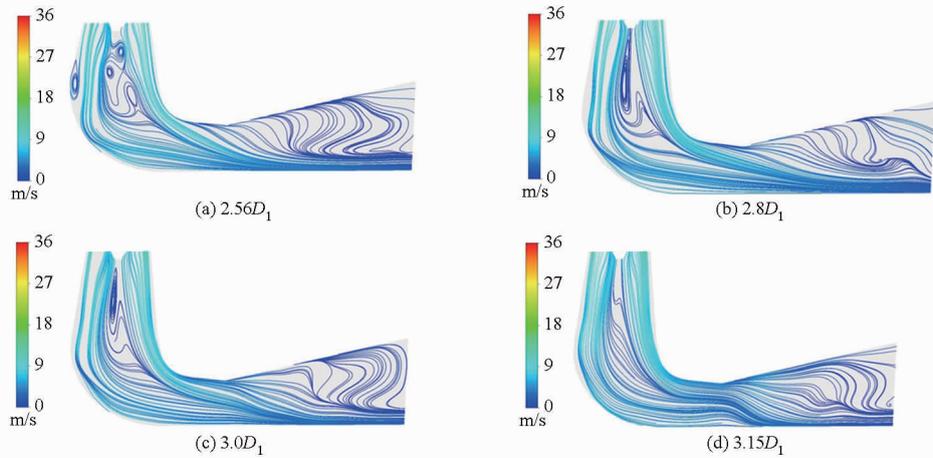


图4 尾水管内部流线图

Fig.4 Streamlines in draft tube

管深度对稳定的影响。压力点的布置及力分量的方向如图5所示。rv1 ~ rv4 为位于靠近壁面的出口边处周向等距布置的记录点,rv4 ~ rv6 为出口截面不同翼展位置处的记录点。dt1 ~ dt4 及 dt5 ~ dt8 分别位于尾水管内直锥段 2 个截面上近壁面周向等距分布的 4 个压力记录点。

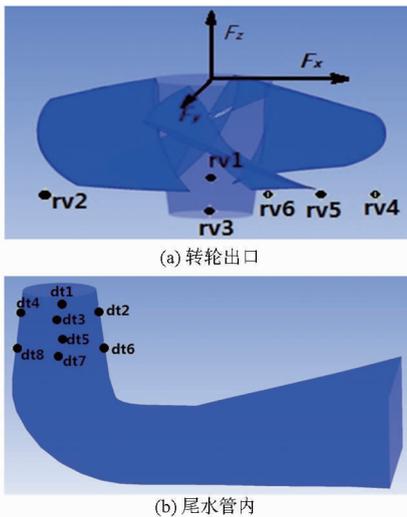


图5 转轮出口及尾水管内压力记录点布置

Fig.5 Pressure record points in runner and draft tube

图6中给出了尾水管直锥段高度(即尾水管深度)的变化对其进、出口湍动能的影响。可以看到在尾水管进口处湍动能变化不大,但依然可以看出在直锥段高度为 $3.0D_1$ 时,转轮出口的湍动能降低。而直锥段出口的湍动能变化可以明显看出,高度增加后,直锥段出口的湍动能显著变化。这表明有旋流经过较高的直锥段后紊流程度有所减轻,流动得到改善。由于转轮和尾水管内流场存在明显的相互作用^[16],在转轮保持不变的情况下,尾水管内流动稳定性的提高,也必然会减小对转轮出口处流场的不利影响。使得转轮内流场的稳定性也得到提高,下文压力脉动峰峰值的分析结果也可以证明这一

点。

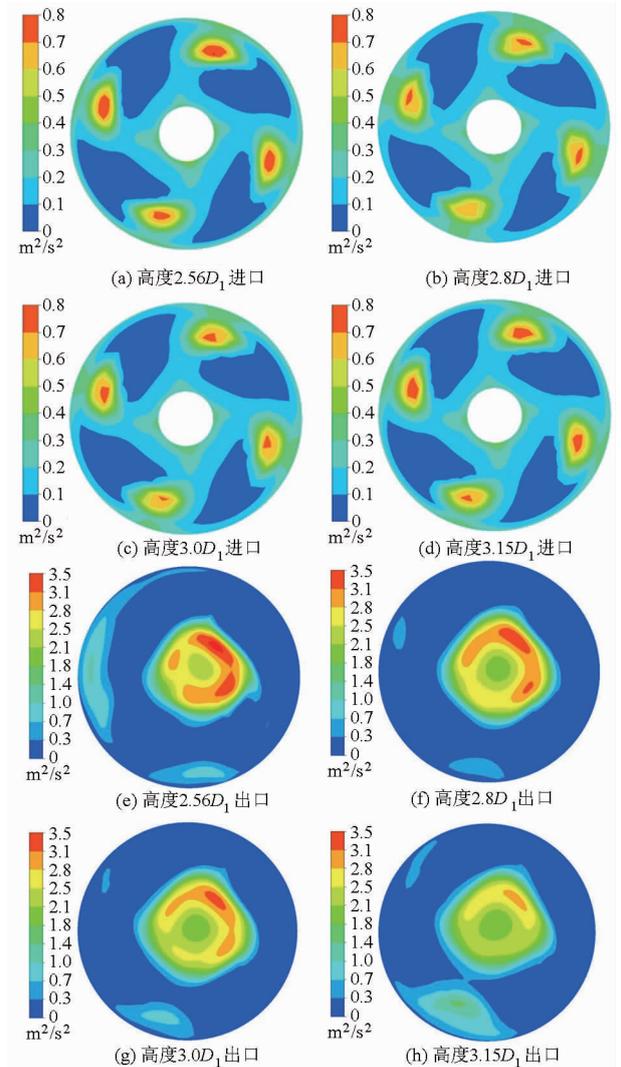


图6 直锥段进出口流场湍动能

Fig.6 Turbulence kinetic energy at inlet and outlet of cone

图7给出了按97%置信概率计算的的压力记录点的脉动峰峰值及转轮受到的3个方向力的变化。图中可以看到,尾水管深度修改前后尾水管内部的脉动变化均比较小,直锥段高度增大后尾水管内流

场压力脉动峰峰值略有降低。这是由于该工况为设计工况,入流条件较好,因此流场脉动较低。然而尾水管深度的变化对转轮出口附近流场的影响非常明显,图中可以看到压力脉动峰峰值出现了显著降低。这表明尾水管内部流场对转轮内部流场影响明显,尾水管直锥段较短时,转轮下游流场本身就比较紊乱,转轮出口流动没有足够的时间恢复流畅,很快就进入弯肘段,改变方向产生冲击,这进一步加剧了转轮下游流动的紊乱。下游流场的扰动势必会影响到转轮内压力场的稳定性,因而在尾水管深度较低时转轮脉动双峰值较高。

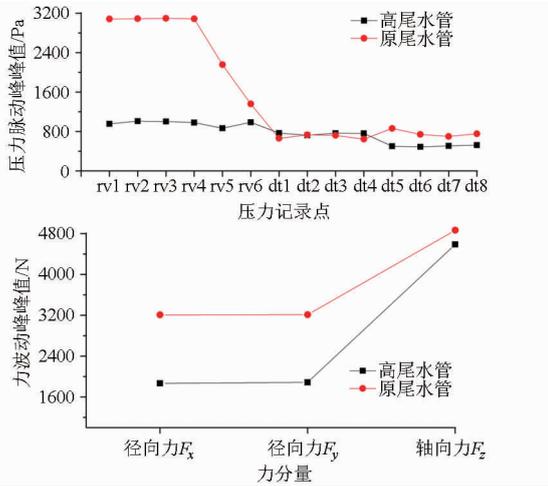


图 7 尾水管加深前后压力记录点与力分量脉动峰峰值
Fig. 7 Peak to peak values of pressure points and force components before and after heightening

转轮所受到的轴向力和径向力也是判断流场稳定性的重要因素,从图 7 可以看出,尾水管加深后,转轮所受到的 3 个方向力的脉动峰峰值均有降低,其中径向力降低最显著,从 3 200 N 降低至 1 800 N,轴向力降低程度略小,3 个力分量的脉动峰峰值变化也进一步证实了尾水管深度增加后流场稳定性得到了改善。

通过傅里叶变换得到了尾水管内及转轮内压力记录点脉动的频率,如图 8 所示。可以看到,尾水管深度增加后,转轮和尾水管内的低频成分消失,只剩下叶片通过频率及其倍频的脉动,且其幅值较低。这表明尾水管较低时的流动漩涡可能是其低频的主要来源,而加深后流动漩涡减轻,因此低频成分消失。可见尾水管深度增大为 $3.0D_1$ 的设计方案对转轮和尾水管内的流场稳定性是非常有利的。

为避免尾水管深度改变影响水轮机的空化性能,本文还通过叶片背面最低压力区的变化简单分

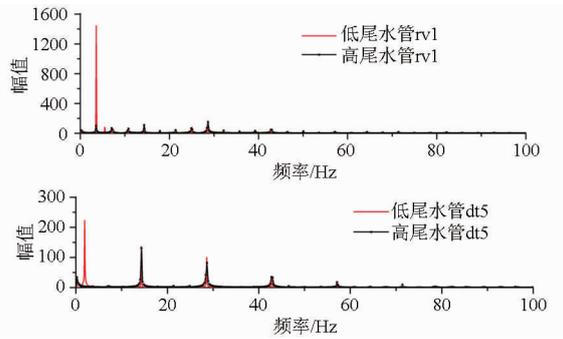


图 8 转轮及尾水管域内压力记录点频率比较
Fig. 8 Frequency comparison of pressure points in runner and draft tube before and after heightening

析了尾水管深度增大对转轮空化性能的影响。图 9 为额定工况下尾水管深度修改前后转轮背面最低压力区的变化。图中红色区域代表高压区域,其它颜色区域为该工况下叶片背面低于临界空化压力的区域,颜色越深压力越低。两者比较来看,提高尾水管深度后,低压区的面积变化不大,但最低压力略有降低。这是由于尾水管回能效果增强,转轮出口平均压力降低所致,但由于低压区的范围较小,且聚集在出口边附近,因而从整体性能来说并不会对空化性能有明显的影

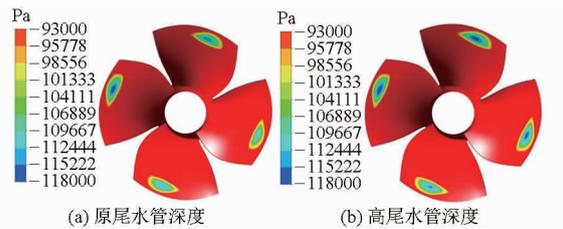


图 9 尾水管深度对叶片背面空化区域的影响
Fig. 9 Effects of draft tube depth on cavitation areas on suction side of blades

5 结论

(1) 增加尾水管深度可降低尾水管中的扩散损失,尾水管回能系数随高度的增大而增加。但深度增加也会增大沿程摩擦损失,因此需要综合考虑效率及经济性因素初步确定尾水管的加高方案。

(2) 尾水管和转轮内流场存在相互作用,因而尾水管深度增加后内部流场的改善也会影响转轮内的流场。直锥段较高的尾水管,内部流场的湍动能降低,进而也减轻了对转轮出口流场的扰动影响。使转轮出口附近的压力脉动峰峰值及各方向的力分量均降低。

(3) 尾水管深度增大后,转轮叶片背面的最低压力略降低,整体来说对转轮空化性能的影响较小。

参 考 文 献

- 1 McNabb J, Devals C, Kyriacou S A, et al. CFD based draft tube hydraulic design optimization [C]// Proceedings of the 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014.
- 2 Galván S, Reggio M, Guibault F. Numerical optimization of the inlet velocity profile ingested by the conical draft tube of a hydraulic turbine [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2015, 137(7):071102.
- 3 Susan-Resiga R, Muntean S, Ciocan T, et al. Surrogate runner model for draft tube losses computation within a wide range of operating points[C]// Proceedings of the 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014.
- 4 Avellan F. Flow investigation in a Francis draft tube: the FLINDT project [C]// Proceedings of the 20th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2000.
- 5 Tridon S, Barre S, Ciocan G D, et al. Discharge imbalance mitigation in Francis turbine draft tube bays [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, 134(4): 041102.
- 6 郭鹏程, 朱国俊, 李响哲, 等. 水轮机尾水管肘管的多工况优化设计 [J]. *水动力学研究与进展*, 2013, 28(6):761-767.
Guo Pengcheng, Zhu Guojun, Li Yunzhe, et al. Multi-point optimization design of draft tube elbow [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2013, 28(6):761-767. (in Chinese)
- 7 魏先导, 冯军, 陈华泉. 混流式水轮机窄高型尾水管的应用研究 [J]. *武汉水利电力大学学报*, 1993, 26(1):1-8.
Wei Xiandao, Feng Jun, Chen Huaquan. Research on the application of narrow draft tubes of Francis turbines [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1993, 26(1):1-8. (in Chinese)
- 8 郭涛, 张立翔. 混流式水轮机尾水管近壁湍流特性和流场结构研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9):112-118.
Guo Tao, Zhang Lixiang. Numerical study of swirling flow fields in Francis turbine under small opening condition [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9):112-118. (in Chinese)
- 9 周凌九, 王正伟, 黄源芳. 尾水管水力稳定性受直锥段高度影响的性能预测 [J]. *大电机技术*, 2004(4):47-51.
Zhou Lingjiu, Wang Zhengwei, Huang Yuanfang. The performance predicting of influence of draft tube height on its hydraulic stability [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2004(4):47-51. (in Chinese)
- 10 Laurent B, Hélène G, Etienne P. Analysis of runner-draft tube numerical coupling on Kaplan and pump turbine cases [C]// Proceedings of the 20th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2000.
- 11 胡西萍. 三甲水电站机型选择及尾水管高度对机组效率的影响 [J]. *甘肃水利水电技术*, 1994(2):25-27.
Hu Xiping. Effect of turbine type and draft tube height on the unit efficiency [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 1994(2):25-27. (in Chinese)
- 12 李仲全, 王军. 尾水管高度和宽度对水轮机水力性能的影响 [J]. *东方电气评论*, 2006, 20(1):20-25.
Li Zhongquan, Wang Jun. The influence of height and width of draft tube on its hydraulic performance [J]. *Dongfang Electric Review*, 2006, 20(1):20-25. (in Chinese)
- 13 Bornard L, Debeissat F, Labrecque Y, et al. Turbine hydraulic assessment and optimization in rehabilitation projects [C]// Proceedings of the 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014.
- 14 Motycak L, Skotak A, Obrovsky J. Analysis of the Kaplan turbine draft tube effect [C]// Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2010.
- 15 De Henau V, Payette F A, Sabourin M, et al. Computational study of a low head draft tube and validation with experimental data [C]// Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2010.
- 16 章登成. 弯肘形尾水管的改形设计对其回能系数影响的研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.
Zhang Dengcheng. The effect of the elbow draft tube shape on the recovery coefficient [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 17 王正伟, 陈柳, 肖若富, 等. 低水头混流式水轮机蜗壳和尾水管结构变化对流动损失的影响研究 [J]. *水力发电学报*, 2008, 27(5):147-152.
Wang Zhengwei, Chen Liu, Xiao Ruofu, et al. Study on influence of the construction change of the spiral casing and draft tube on the flow loss in low head Francis turbine [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(5):147-152. (in Chinese)
- 18 Müller A. Physical mechanisms governing self-excited pressure oscillations in Francis turbine [D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2014.