

Transient Numerical Simulation of Impulse Hydropower Station with Surge Shaft

Jin Jiang¹, Dongdong Li¹, Zhuo Zhao¹, Gang Lan¹, Wanshuang Yi¹, Qingtang Zeng²

¹School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Province Water Resource and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan

Email: 1061758248@qq.com

Received: Feb. 25th, 2013; revised: Mar. 17th, 2013; accepted: Mar. 24th, 2013

Abstract: Water diversion system of hydropower station with impulse turbine is longer, and has a large body of water inertia, which has a greater impact on the system pressure and the diversion pipeline water hammer pressure, so the power station can reduce the system pressure fluctuations by install the surge shaft. From the working mechanism of the object, this paper established a mathematical model of the transition process of impulse hydropower station with surge shaft and make the simulation experiments. Through the transient numerical simulation and calculate the transition process and surge shaft water level of various operating conditions. The results showed that the surge shaft can reduce pressure fluctuations in the system, and ensure the normal operation of the hydropower stations.

Keywords: Surge Shaft; Long Water Diversion System; Impulse Hydropower Station; Transient; Numerical Simulation

有调压井冲击式水电站过渡过程建模与仿真研究

蒋 劲¹, 李东东¹, 赵 卓¹, 兰 刚¹, 易万爽¹, 曾庆堂²

¹武汉大学动力与机械学院, 湖北

²湖北省水利水电规划勘测设计院, 湖北

Email: 1061758248@qq.com

收稿日期: 2013 年 2 月 25 日; 修回日期: 2013 年 3 月 17 日; 录用日期: 2013 年 3 月 24 日

摘 要: 冲击式水电站引水系统长, 水体惯性较大, 对系统压力和电站引水管道水锤压力影响较大, 一般通过装设调压井来减小系统压力波动。本文从对象的工作机理出发, 建立了某有调压井冲击式水电站的过渡过程数学模型, 并进行仿真实验, 通过计算各种过渡过程下系统压力和调压井水位的变化, 证明装设调压井能够减小系统在调压时的压力波动, 能够保证水电站的正常运行。

关键词: 调压井; 长引水系统; 冲击式水电站; 过渡过程; 数值模拟

1. 引言

冲击式水轮机利用来自机组引水管的高压水流, 在进入水轮机之前借助特殊的导水装置(喷嘴)转变成具有高动能的自由射流, 冲击转轮, 驱动其旋转, 从而将其动能大部分传递给转轮^[1,2]。对于冲击式水电站, 一般都具有较长的机组引水管道, 对于长引水系统, 由于水流惯性较大, 导致系统压力受到水锤压力的影响较大, 因此可以通过装设调压井来稳定系统压

力, 确保机组满足调节保证计算^[3,4]。本文以具体的冲击式水电站为计算实例, 通过过渡过程的计算, 对其安全稳定进行了具体分析。

2. 计算模型

2.1. 冲击式水轮机

冲击式水轮机的喷嘴是一个带针阀的孔口, 符合孔口出流规律, 水轮机转速变化对孔口出流没有影响

[5]。阀门处 A 点的边界条件:

$$v_i^A = q_i^A = \tau_i \sqrt{\xi_i^4 + 1}$$

式中 $\tau_i = \omega_i / \omega_{\max}$ 为相对开度; ω_{\max} 为喷嘴全开时断面积; $\xi = \Delta H_i / H_0$ 为任意时刻水锤压力相对值;

$\frac{Q_i}{Q_{\max}} = \frac{FV_i}{FV_{\max}} = v_i^A = q_i^A$ 为任意时刻相对流速及相对流量。

2.2. 双向调压塔

双向调压塔主要作用是减小压力波动。当管道压力降低时,调压塔水流入管道,减缓压力降低;当管道压力升高时,管道水流入调压塔,减缓压力升高^[6]。双向调压塔的工作过程及数学模型如下:

在稳态过程中双向调压塔与输水管道之间流量为零,即 $Q_{p3} = 0$ 。如果管道压力出现波动,调压塔和输水管之间的流量就不为零。以管道压力降低,调压塔水流向管道为例分析,则由连续性原理可知:

$$Q_{p1} + Q_{p3} = Q_{p2}$$

$$Q_{p3} = C_d A_p \sqrt{2g(H_{p3} - H_p)}$$

$$H_{p3} = H_3 - 0.5\Delta t(Q_{p3} + Q_3)/A_{st}$$

式中, Q_{p1} 为流入调压塔所在节点处的流量; Q_{p1} 为流出调压塔所在节点处流量; Q_{p3} 为调压塔流出的流量; H_{p3} 为任意时刻双向调压塔内水位; H_3 时段 Δt 初的水位和流出水体的体积对应的水深; A_{st} 为双向调压塔的面积。

再加上主管道的相容性特征线方程,即

$$\left. \begin{aligned} Q_{p1} &= (C_p - H_p)/B \\ Q_{p2} &= (H_p - C_m)/B \end{aligned} \right\}$$

可得:

$$\left. \begin{aligned} Q_{p1} &= (C_p - C_m)/2B - Q_{p3}/2 \\ Q_{p2} &= Q_{p1} + Q_{p3} \\ H_p &= C_p - BQ_{p1} = C_m + BQ_{p2} \end{aligned} \right\}$$

3. 水锤计算的特征线法

水电站的调保计算是对整个水电站装置进行过渡过程计算分析,包括管道内点及与管道连接的各部分(边界点)。在调保计算中,对于管道系统内点的

计算是求解水锤基本方程,即由运动方程和连续性方程组成的双曲型偏微分方程组。为了实现计算机的编程计算,需采用特征线方法将该偏微分方程组离散化,为此,先沿特征线方向将它转换为水锤全微分方程:

$$C^+ : \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = +a \end{cases} \quad (1)$$

$$C^- : \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (2)$$

由上式(1)和(2)进行有限差分近似可得:

$$C^+ : H_p = C_p - BQ_p, C^- : H_p = C_m + BQ_p$$

式中, $B = \frac{a}{gA}$; $R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$;

$$\begin{aligned} C_p &= H_A + BQ_A - RQ_A|Q_A| \\ C_m &= H_B - BQ_B + RQ_B|Q_B| \end{aligned}$$

4. 工程概况

电站安装两台冲击式水轮发电机组,每个机组有6个喷嘴,喷嘴直径为15.6 cm(当量喷嘴直径 $d = 0.5$ m),引水压力钢管向水轮发电机组的供水方式为一管两机,钢管进口起始点在高程2619.55 m处。整条钢管由主管、弯管、岔管、支管4部分组成。主管直径 $D = 2.4$ m,支管直径 $D = 1.4$ m,钢管轴线全长830.51 m。设计水头按上游正常蓄水位2700.00 m计算,机组安装高程2225.10 m,钢管末端最大设计水头(含水锤压力升值)579 m,主材采用Q345C、Q390钢板。引水系统长度为9934 m,静水头462.6 m;设计流量 $Q = 19.32$ m³/s,正常蓄水位2700.00 m。

调压井形状为:2651 m高程以上衬砌为内径8.5 m的圆筒,调压井桶壁衬砌顶部高程2719 m,2651 m高程以下衬砌后为3 m内径的圆筒至底部,2628.657~2626.657 m高程的收缩孔直径为1.33 m。

5. 计算结果分析

5.1. 过渡过程计算

主要分析计算了启动和停机的几种不同工况下

压力的变化和调压井液面的变化情况。

5.1.1. 两台机组同时 40 秒停机

过渡过程最大压力 4.86 MPa，最小压力 0.57 MPa，最大压力/稳态压力 <1.2，系统没有负压出现，满足规范要求。调压井最高水位 2713 米，最低水位 2687 米，没有溢流，也没有见底。图 1~3 是计算结果图。

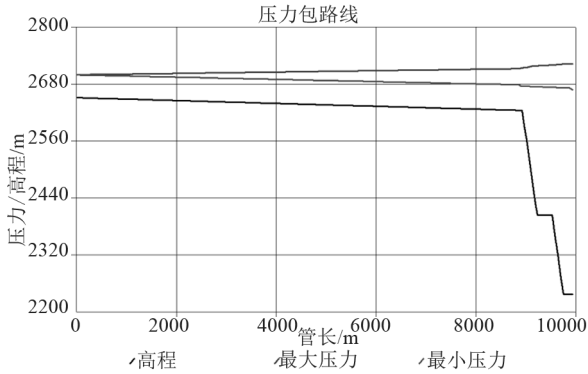


Figure 1. pressure envelope curves
图 1. 压力包络线

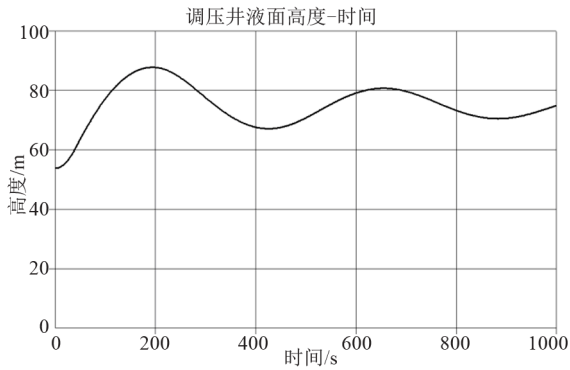


Figure 2. The liquid level variation curve of the surge tank
图 2. 调压井液面变化曲线

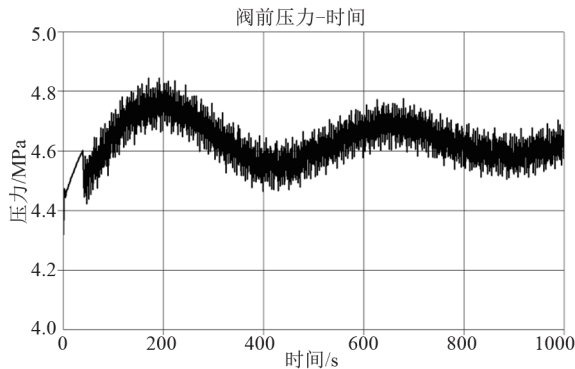


Figure 3. Pressure versus time curve before needle valv
图 3. 调针阀前压力随时间变化曲线

5.1.2. 一台机组保持关机，另一台机组 40 秒启动

过渡过程最大压力 4.63 MPa，最小压力 0.57 MPa，最大压力/稳态压力 <1.2，系统没有负压出现，满足规范要求。调压井最高水位 2701 米，最低水位 2687 米，没有溢流，也没有见底。图 4~6 是计算结果图。

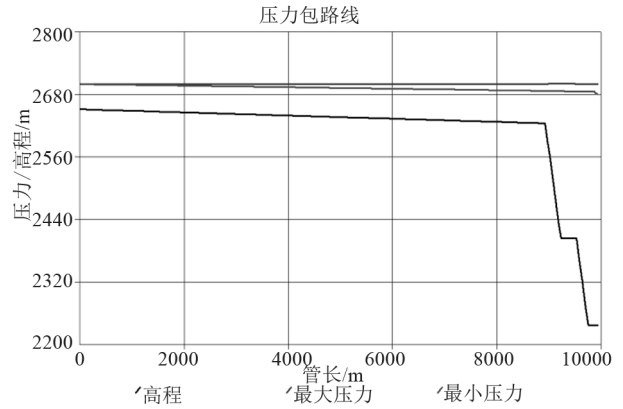


Figure 4. pressure envelope curves
图 4. 压力包络线

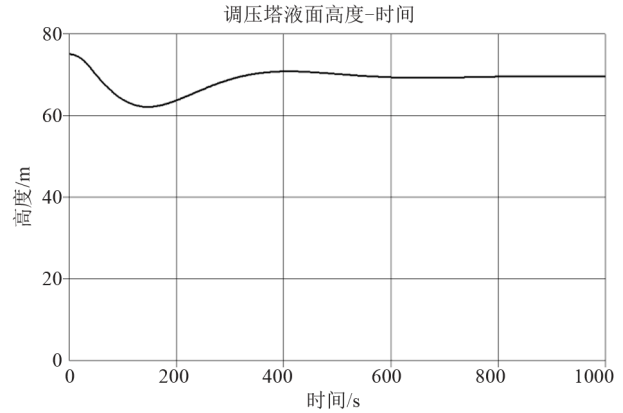


Figure 5. The liquid level variation curve of the surge tank
图 5. 调压井液面变化曲线

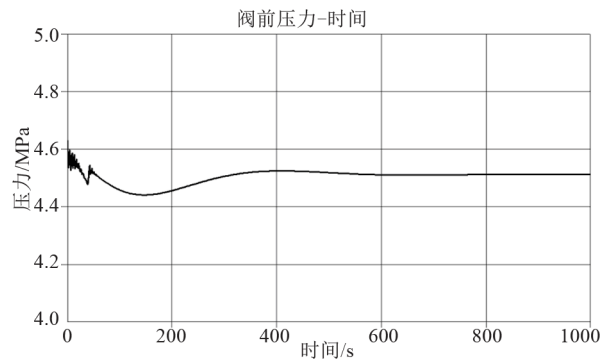


Figure 6. Pressure versus time curve before needle valve
图 6. 针阀前压力随时间变化曲线

5.1.3. 一台机组保持运行，另一台机组 40 秒启动

过渡过程最大压力 4.56 MPa，最小压力 0.57 MPa，最大压力/稳态压力 <1.2，系统没有负压出现，满足规范要求。调压井最高水位 2695 米，最低水位 2678 米，没有溢流，也没有见底。图 7~9 是计算结果图。

5.2. 小波动计算

小波动计算主要是在正常蓄水位下，针对一台不变、一台机组在 10%内调整负荷计算。

5.2.1. 一台机组不变，一台机组减负荷

根据 2 台机组同时甩负荷的过渡过程计算结果，减负荷机组的喷针关闭速率按照 1/40 s(即喷针开度从 1 到 0 的匀速关闭时间为 40 s)考虑，不同负荷变化条件下的水锤计算结果如表 1 所示。

5.2.2. 一台机组不变，一台机组增负荷

根据一台运行、一台启动的过渡过程计算结果，增负荷机组的喷针开启速率按照 1/40 s(即喷针开度从 0 到 1 的匀速开启时间为 40 s)考虑，不同负荷变化条件下的水锤计算结果如表 2 所示。从计算结果可以看到当一台机组满负荷运行，另一台机组调整负荷在 10%的范围内时压力波动很小，也不会出现负压。

6. 结论

1) 在计算的所有工况中，调压井都没有溢流的情况，最高水位为 2713 米(顶部高程 2719 米)，最低水位 2680 米，没有溢流，也没有见底。一台机组保持运行，40 秒启动另一台机组的情况下，只要进水池水位不低于 2663 米，调压井就不会在过渡过程中出现见底的情况；

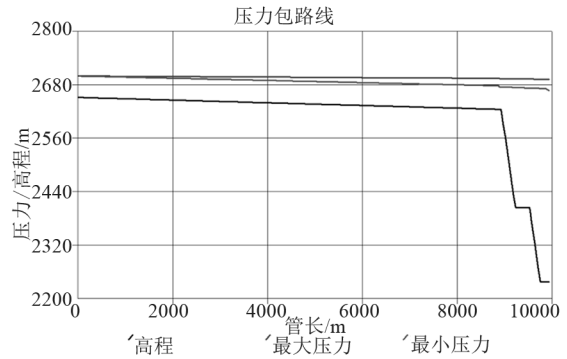


Figure 7. pressure envelope curves
图 7. 压力包络线

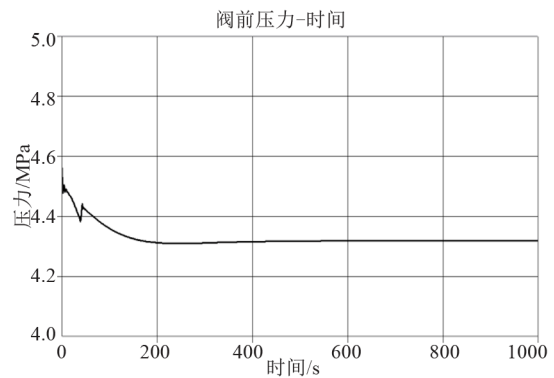


Figure 8. The liquid level variation curve of the surge tank
图 8. 调压井液面变化曲线

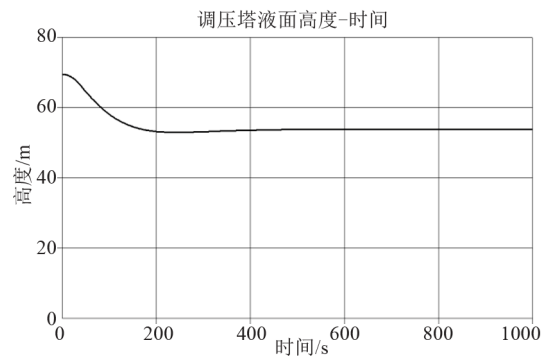


Figure 9. Pressure versus time curve before needle valve
图 9. 针阀前压力随时间变化曲线

Table 1. Water hammer calculation results under different load change conditions
表 1. 不同负荷变化条件下的水锤计算结果

喷针起始开度/ 最终开度	分叉点初始 压力(m)	分叉点最大 压力(m)	起始流量/最终流量(m ³ /s)		调压塔初始 液面高度/m	调压塔最终 液面高度/m
			减负荷机组	未调节机组		
1/0.7	4.36	4.43	9.66/6.82	9.66/9.74	53.8	59.4
0.7/0.6	4.43	4.45	6.82/5.88	9.74/9.76	59.4	61.2
0.6/0.5	4.45	4.47	5.88/4.91	9.76/9.79	61.2	62.9
0.5/0.4	4.47	4.49	4.91/3.93	9.79/9.81	62.9	64.3

Table 2. Water hammer calculation results under different load change conditions
表 2. 不同负荷变化条件下的水锤计算结果

喷针起始开度/ 最终开度	分叉点初始 压力(m)	分叉点最低 压力(m)	起始流量/最终流量(m ³ /s)		调压塔初始 液面高度/m	调压塔最终 液面高度/m
			减负荷机组	未调节机组		
0.7/1	4.43	4.22	6.82/9.66	9.74/9.66	59.4	53.8
0.6/0.7	4.45	4.38	5.88/6.82	9.76/9.74	61.2	59.4
0.5/0.6	4.47	4.4	4.91/5.88	9.79/9.76	62.9	61.2
0.4/0.5	4.49	4.42	3.93/4.91	9.81/9.79	64.3	62.9

2) 在计算的所有工况中,管线的最高压力为 4.86 MPa, 出现在针阀前端, 出现最大压力的工况是“进水池水位 2700 米, 两台机组同时 40 秒停机”, 最大压力低于额定压力的 1.2 倍。管线的最小压力为 0 米, 出现在调压井进口, 隧洞其他位置压力均高于此最小压力;

3) 装设调压井, 能够有效减小系统在调保时的压力波动, 保证其正常运行。

值模拟[J]. 水力发电学报, 2007, 26(2): 133-136.

[2] 李玲, 杨建东. 冲击式水电站取消调压室的研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 88-90.

[3] 杨开林. 电站与泵站中的水利瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

[4] 詹佳佳, 杨建东, 付亮. 机组甩负荷实验与仿真计算的对比分析[J]. 人民长江, 2007, 2: 117-119.

[5] 吴荣樵, 陈鉴治. 水电站水力过渡过程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

[6] 陈祥荣, 沈家骏. 长引水隧洞电站调压室的特殊水力学问题研究[J]. 红水河, 1999, 1: 59-66.

参考文献 (References)

[1] 樊红刚, 陈乃祥, 孔庆蓉, 王芊丁. 冲击式水电站过渡过程数