

# 水电站尾水调压室断面面积敏感性分析研究

贾岩<sup>1</sup>, 张晓宏<sup>1</sup>, 刁雪芬<sup>2</sup>, 张俊发<sup>1</sup>, 占小涛<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 山东新汇建设集团有限公司, 山东 东营 257000;  
3. 韶关市水利水电勘测设计咨询有限公司, 广东 韶关 512000)

**摘要:** 基于瞬变流理论, 采用弹性水锤特征线法, 建立合理的边界条件, 对有较长尾水隧洞的水电站调压室断面面积变化敏感性进行数值模拟分析, 重点研究尾水调压室的断面面积对大波动工况下的调压室水位波动、机组最大转速升高率、蜗壳末端压力变化和水力干扰工况下对水电站机组出力摆动的影响。对同一特征工况, 在大波动下, 调压室断面直径为 28 m, 即断面面积为 615.752 m<sup>2</sup> 时, 调压室最低涌浪水位达到 2 218.97 m, 蜗壳末端最大压力达到 269.17 m (压力升高 24.48%), 机组转速最大上升率达到 42.19%, 满足调节保证计算要求。水力干扰工况下, 并入同一电网时, 随着调压室断面面积增加, 机组出力摆动减小, 对于大电网而言, 出力摆动相对差值变化较小, 两台机组甩负荷时, 受扰机组出力摆动相对差值相差 0.08%, 一台机组甩负荷时, 受扰机组出力摆动相对差值相差 0.03%。综合考虑计算结果及调压室的工程经济性, 推荐本电站调压室断面面积取 615.752 m<sup>2</sup>。

**关键词:** 水电站; 尾水调压室; 调压室断面面积; 调压室涌浪; 水力干扰; 敏感性分析

中图分类号: TV732.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0129-05

## Sensitivity analysis of section area of tailrace surge chamber in hydropower station

JIA Yan<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohong<sup>1</sup>, DIAO Xuefen<sup>2</sup>, ZHANG Junfa<sup>1</sup>, ZHAN Xiaotao<sup>3</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shandong Xinhui Construction Group Co., Ltd, Dongying 257000, China; 3. Shaoguan Water Conservancy and Hydropower Survey Design Consulting Co., Ltd, Shaoguan 512000, China)

**Abstract:** Based on the theory of transient flow, the elastic water hammer characteristic line method was used to establish the reasonable boundary conditions, and the numerical simulation analysis was made on the sensitivity of section change of surge chamber in long tailrace tunnel. and detailed study the effect of surge of water level in surge chamber maximum rise rate of disturbed unit and pressure at end of volute under large fluctuation condition and unit output swing of hydropower station on the section area of Tail-race surge chamber under hydraulic interference condition. On the same characteristics condition, under the condition of large fluctuations, when the surge chamber area is 615.752m<sup>2</sup>, minimum surge level water level reached 2218.97m, the end of the volute pressure reaches 269.17m (pressure on 24.48%), maximum speed rise rate reached 42.19%, which meet the request of the regulation guarantee calculation. Under hydraulic disturbance condition, incorporated into the same grid, when the surge chamber section area increased, the unit output swing will decrease. For large power grid, the relative difference of output swing have smaller minor change to small power grid. Besides, the relative difference of disturbed unit differ is 0.08% when double units load rejection, and the relative difference of disturbed unit differ is 0.03% when just single unit load rejection. Considering the calculation result and the engineering economy of the surge chamber synthetically, it is reasonable to recommend that the sectional area of the tailrace surge chamber of the power plant be 615.752m<sup>2</sup>.

收稿日期: 2017-08-14; 修回日期: 2017-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279162)

作者简介: 贾岩(1992-), 男, 黑龙江黑河人, 在读硕士研究生, 研究方向为水电站水力过渡过程。

通讯作者: 张晓宏(1962-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水电站水力过渡过程。

**Key words:** hydropower station; tailrace surge chamber; sectional area of surge chamber; surge in surge chamber; hydraulic disturbance; sensitivity analysis

## 1 研究背景

对于大型首部式地下水电站厂房,由于尾水隧洞较长,势必会产生相当大的水锤压力,影响水电站的运行稳定。为了减小压力管道和水轮机的水锤压力,改善水电站在甩负荷时候的运行条件及供电质量,需要设置尾水调压室以减小水锤压力,避免产生负水锤,保证电站的安全运行<sup>[1-4]</sup>。调压室的尺寸又直接关系到其调节能力,但在调压室的位置初步确定的情况下,由于地质、地形条件等因素<sup>[5-6]</sup>,调压室的高度一般不会有太大的改变,前人对调压室阻抗孔尺寸及其流量系数进行了较为深入的研究<sup>[7-9]</sup>,却很少有人全面的研究调压室断面面积对大波动和水力干扰过渡过程的影响,所以本文以某实际水电站工程为例,重点研究不同的调压室断面面积对大波动、水力干扰等工况的影响<sup>[10]</sup>,以确定合适的调压室断面尺寸,并且为类似的研究提供理论参考。

## 2 工程概况

某水电站位于青海省贵德县与贵南县交界的黄河干流上,电站主要承担了西北电网的调峰和事故备用的作用。有压引水式电站的地下洞群包括主副厂房、主变开关室、压力管道、尾水调压室、尾水管及尾水洞等。如图1所示。

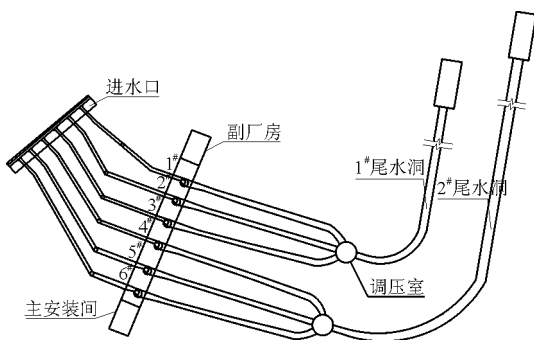


图1 电站平面布置示意图

压力引水管道为全地下埋管布置,按“一机一管”方式供水,管道内径9.5 m。尾水系统为“三机,一室,一洞”的布置形式,两个独立的圆形尾水调压室直径均为28 m。尾水洞直径17.5 m,两条尾水洞分别长519、712 m。电站装机6台,单机容量700 MW,水轮机型号HLV155-LJ-690,额定转速

142.9 r/min,额定功率711 MW,额定流量378 m<sup>3</sup>/s,水轮机最大水头220 m,最小水头192 m,额定水头205 m。

## 3 计算方法简介

### 3.1 特征线法

偏微分方程的一般解是不存在的,若想求解,可以用特征线法把偏微分方程变换成特殊的全微分方程,然后对全微分方程进行积分,得到便于数值处理的有限差分方程。通过两个实数 $\lambda$ 把由水锤的两个基本方程即:运动方程和连续方程得到的偏微分方程变成常微分方程,当相应方程的约束满足时,方程才成立,将解在 $xt$ 平面上展开,如图2所示,沿正向、反向特征线方程才成立。在变换原微分方程中,并没有做过数学近似,因此由新方程得到的解就是原方程的解。

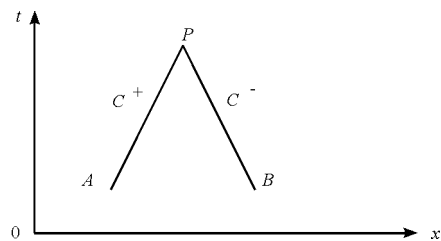


图2  $xt$ 平面上的特征线

### 3.2 边界条件

用特征线法求解水力过渡过程问题,需要首先建立边界条件的数学模型,本文的研究对象所涉及的边界主要包括:电站引水系统进口节点、串联管道节点、调压室节点以及水轮发电机边界节点等。

## 4 尾水调压室断面面积敏感性分析

任何情况下,尾水调压室内的水位波动都应该是衰减的,但是水轮机在实际运行中由于调速器作用,会使出力而非流量保持不变,所以有可能出现调压室水位下降(上升)和导叶开度减小(增大)交替进行的情况,进而造成调压室水位波动不衰减的现象<sup>[11]</sup>。托马通过研究得出,调压室存在最小的断面面积使其稳定。水电站调压室设计规范中推荐调压室断面面积取托马断面面积的1.0~1.1倍<sup>[12]</sup>,因此计算中拟定了调压室直径为26、28、30 m(对应调压室断面面积为530.929、615.752、706.858 m<sup>2</sup>)3种尺寸。

4.1 对大波动过渡过程的影响

本工程尾水调压室为阻抗式,阻抗孔直径为 10.5 m,流量系数为 0.7。水轮机转动惯量( $G \cdot D^2$ )为 131 000  $t \cdot m^2$ ,导叶关闭规律为两段式关闭。选取下游设计洪水水位下,尾水道糙率取最大值,3 台机组同时运行突甩全部负荷为工况 A;3 台机组满负荷运行尾水位下,尾水管糙率取最小值,3 台机组同时甩全负荷为工况 B。拟定工况见表 1,计算分析成果见表 2。

表 1 大波动工况列表

工况	阻抗孔直径/m	调压室直径/m	调压室断面面积/ $m^2$
A	10.5	26	530.929
		28	615.752
		30	706.858
B	10.5	26	530.929
		28	615.752
		30	706.858

表 2 大波动过渡过程成果计算分析表

工况	调压室断面面积/ $m^2$	转速最大升高率/%	蜗壳末端最大压力/m	尾水管进口最小压力/m	阻抗板压差/m		调压室涌浪水位/m	
					向下	向上	最高	最低
A	530.929	42.24	276.13	0.60	7.39	-5.87	2255.69	2224.14
	615.752	42.19	276.15	1.78	7.83	-5.55	2254.40	2225.86
	706.858	42.14	276.16	2.61	8.22	-5.26	2253.31	2227.36
B	530.929	42.25	269.15	-6.34	7.36	-5.97	2249.07	2217.25
	615.752	42.19	269.17	-5.16	7.79	-5.66	2247.77	2218.97
	706.858	42.15	269.18	-4.20	8.18	-5.36	2246.68	2220.47

从表 2 可见,在阻抗孔尺寸相同的情况下,随调压室直径增大,蜗壳末端压力变化不大;转速上升率有减小的趋势,但影响也非常小;尾水管进口最小压力变大,阻抗板压差增大,调压室最高、最低涌浪水位有所改善。各工况不同调压室断面面积下的调压室、尾水管参数变化如图 3 所示。B 工况下,当调压室断面面积为 530.929  $m^2$  时,调压室最低涌浪水位与阻抗板高程 2217.00 m 差 0.25 m,不满足规范要

求的安全水深,尾水管真空度为 6.34 m,超过控制指标 5.53 m,因此调压室断面面积 530.929  $m^2$  方案不合理。而当断面面积为 706.858  $m^2$  时,各控制指标均满足控制值,安全裕度大,但与断面面积为 615.752  $m^2$  的方案相比,开挖、衬砌量均相应加大,不够经济。而调压室断面面积为 615.752  $m^2$  时,在 B 工况下的尾水管真空度为 5.16 m,小于控制指标要求的 5.53 m,调压室最低涌浪水位有 1.97 m 的

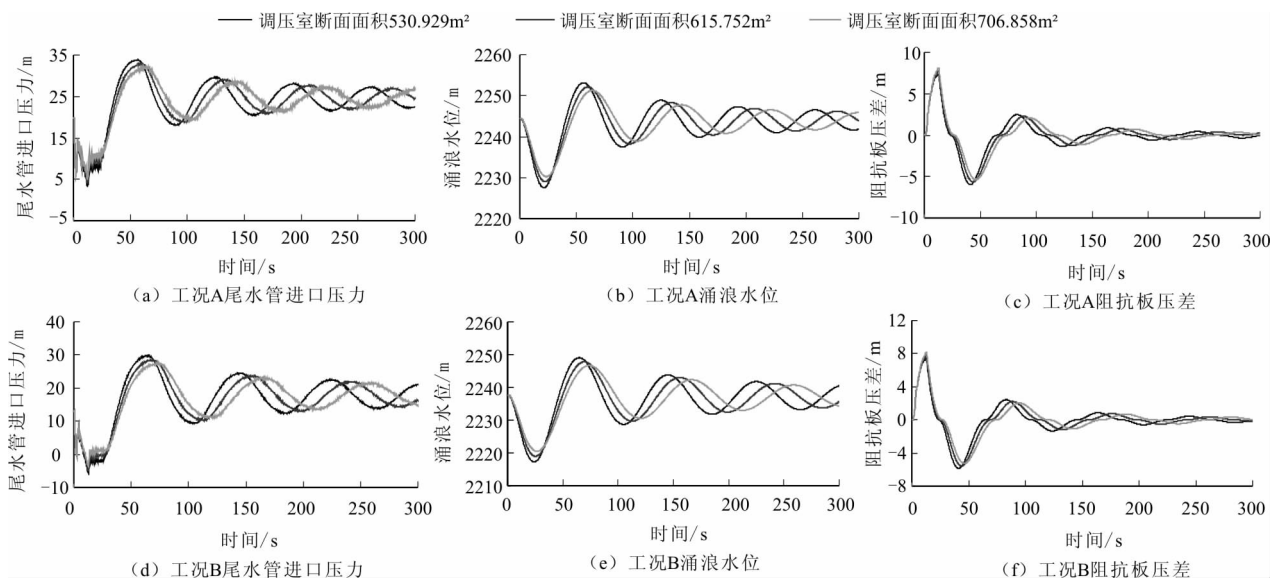


图 3 各工况不同调压室断面面积下的调压室、尾水管参数变化图

安全水深,安全裕度较大。因此,在经济开挖、衬砌量的基础上,考虑电站的运行状况,选取尾水调压室直径为28 m,尾水调压室断面面积为615.752 m<sup>2</sup>。

#### 4.2 对水力干扰过渡过程的影响

本电站尾水系统是按“三机,一室,一洞”的形式布置的,当3台机组并网运行时,任意甩负荷的机组都会影响其他机组的出力和转速,即存在水力干扰<sup>[13-15]</sup>。本文选取并理想大电网频率调节和并有限电网频率调节两种情况进行计算:(1)机组联入无穷大电网条件下,机组频率保持不变,系统中负荷的波动由电网承担,机组实行等开度调节(调速器不参与调节),在具体计算中,正常运行的机组及甩负荷机组

均按大波动进行计算。(2)机组联入有限电网,在电网中担负调频任务,机组实行功率调节模式(此时调速器参与调节),其能力将影响电网的供电质量,在具体计算中,正常运行的机组按小波动进行计算,甩负荷机组按大波动进行计算。取调压室断面面积分别为530.929、615.752、706.858 m<sup>2</sup>,分别计算1台机、两台机甩负荷的情况,分析对其他机组出力摆动的影响,验算大波动下选取的调压室尺寸是否合理。拟定了G1、G2、G3、G4共4个工况,工况说明见表3,结果见表4(管道糙率取平均值,阻抗孔尺寸、机组转动惯量、导叶关闭规律均与前文一致),各工况不同调压室断面面积下的机组出力过程线见图4。

表3 水力干扰计算工况

工况	上游水位/m	下游水位/m	工况说明	并网类型
G1	2452.0	2243.94	额定水头,额定出力运行,5 <sup>#</sup> 机甩额定负荷对4 <sup>#</sup> 、6 <sup>#</sup> 机的干扰	并理想大电网
G2	2452.0	2243.94	额定水头,额定出力运行,4 <sup>#</sup> 、6 <sup>#</sup> 机甩额定负荷对5 <sup>#</sup> 机的干扰	并理想大电网
G3	2452.0	2243.94	额定水头,额定出力运行,5 <sup>#</sup> 机甩额定负荷对4 <sup>#</sup> 、6 <sup>#</sup> 机的干扰	并入有限电网
G4	2452.0	2243.94	额定水头,额定出力运行,4 <sup>#</sup> 、6 <sup>#</sup> 机甩额定负荷对5 <sup>#</sup> 机的干扰	并入有限电网

表4 水力干扰过渡过程计算结果

调压室断面面积/m <sup>2</sup>	工况 G1		工况 G2		工况 G3		工况 G4	
	4 <sup>#</sup> 最大出力/ MW	出力摆动/ %	5 <sup>#</sup> 最大出力/ MW	出力摆动/ %	4 <sup>#</sup> 最大出力/ MW	出力摆动/ %	5 <sup>#</sup> 最大出力/ MW	出力摆动/ %
	530.929	747.24	5.07	781.12	9.84	734.84	3.32	749.46
615.752	744.54	4.69	775.47	9.05	731.44	2.85	743.65	4.57
706.858	742.04	4.34	770.44	8.34	727.80	2.34	737.41	3.69

注:初始出力为711.183MW。

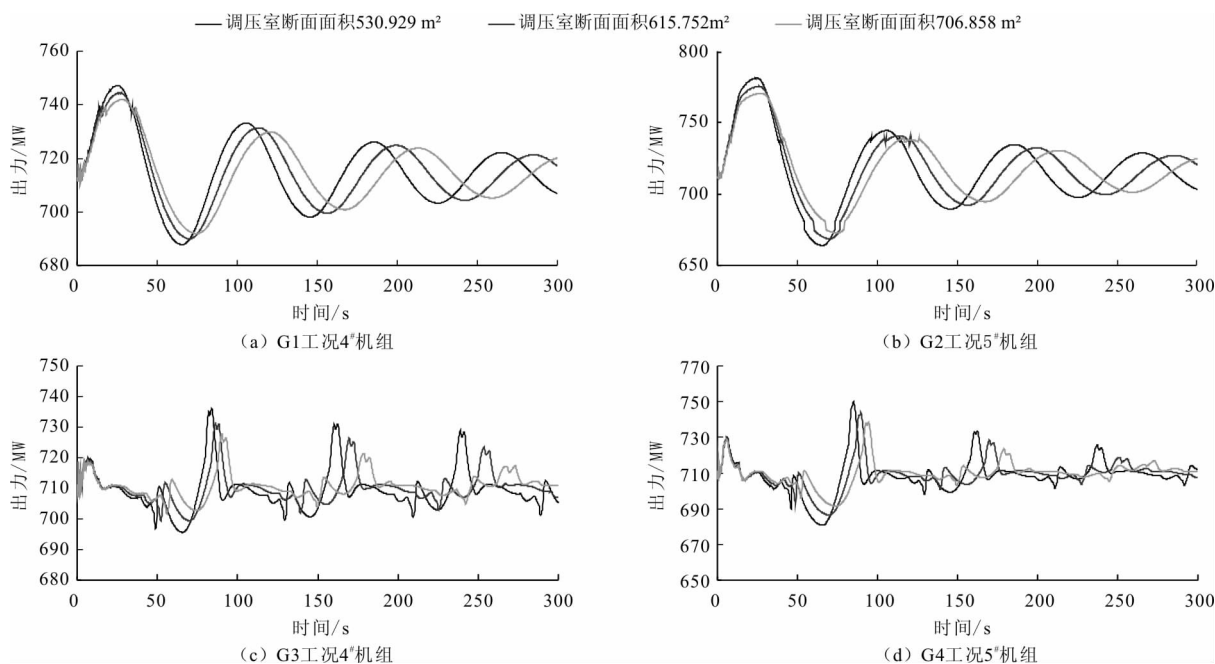


图4 各工况不同调压室断面面积下的机组出力过程线

由上表分析可知,并同一电网情况下,随着调压室断面面积增大,机组出力摆动减小,这是因为,拥有大断面的调压室,调压室内涌浪水位波动幅度较小,从而机组出力摆动较小。调压室断面面积从 $530.929\text{ m}^2$ 到 $615.752\text{ m}^2$ 再到 $706.858\text{ m}^2$ ,出力摆动明显改善,两台机组甩负荷时,受扰机组出力摆动相对差值约为 $0.7\% \sim 0.9\%$ ,而一台机组甩负荷时,受扰机组出力摆动相对差值约为 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。结合本工程的电网条件,G1、G2工况下,3组调压室断面面积依次由小到大变化时,机组出力摆动相对差值不大,仅为 $0.03\%$ 和 $0.08\%$ 。

## 5 结 论

选择合适的尾水调压室断面面积不仅需要考虑大波动下的机组转速升高率、调压室涌浪水位、蜗壳末端压力变化,而且还涉及到共用同一尾水调压室的机组水力干扰问题;选择合适的调压室断面面积不仅关系到水电站运行的安全稳定,而且,若机组出力摆动过大,则还会对发电机和电网产生冲击<sup>[16]</sup>;选择合适的调压室断面面积还可以在保证安全的前提下尽量降低调压室的工程量。

本文通过计算:

(1)大波动下,从机组转速升高率、调压室涌浪水位、蜗壳末端压力变化的角度,结合经济开挖、衬砌等方面因素,拟定调压室断面面积为 $615.752\text{ m}^2$ ;

(2)由不同水力干扰工况下,对比各个调压室断面面积相应的机组出力摆动、机组出力摆动差值和机组出力摆动差值的变化量可知,调压室断面面积再增大则意义不大,反而不经济,同样可以表明调压室断面面积为 $615.752\text{ m}^2$ 是合理的。

### 参考文献:

[1] 洪振国. 水电站调压井形式比选研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(4):113-115+117.

- [2] 洪振国. 水电站调压井特征线法水力计算研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(4):163-166.
- [3] 刘启钊,彭守拙. 水电站调压室[M]. 北京:中国水利电力出版社,1995.
- [4] 鲍海艳. 水电站调压室设置条件及运行控制研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
- [5] 占小涛,张晓宏,张俊发. 调压室位置和面积变化对尾水管压力的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):125-129.
- [6] 杨鹏,李洪任,许小华,等. 输水洞径对调压室最佳位置的影响[J]. 水电能源科学,2016,34(9):115-117+126.
- [7] 陈剑,杨校礼,张健. 带连接管的阻抗调压室流量系数及水力损失特性研究[J]. 水电能源科学,2014,32(11):164-167.
- [8] 何东阳,张健,俞晓东,等. 长廊式尾水调压室阻抗孔波动特性的影响分析[J]. 水电能源科学,2016,34(11):171-174+186.
- [9] 张晓宏,刁雪芬,张俊发. 调压室阻抗孔过流特性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(7):143-148.
- [10] 吴世勇,周济芳,申满斌. 锦屏二级水电站复杂超长引水发电系统水力过渡过程复核计算研究[J]. 水力发电学报,2015,34(1):107-116.
- [11] 马善定,汪如泽. 水电站建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社,1982.
- [12] 中华人民共和国. SL 655-2014 水利水电工程调压室设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [13] 余雪松,李高会,羊鸣. 仙游电站水力干扰试验及预测研究[J]. 人民长江,2015,46(18):83-85+96.
- [14] 杨飞,李高会,吕慷. 水电站并网运行方式与水力干扰研究[J]. 小水电,2012(3):23-25.
- [15] 赖旭,陈强. 调速器参数对水电站水力干扰过渡过程的影响[J]. 中国农村水利水电,2016(5):174-178+182.
- [16] 陈启卷,郭海峰,李俊益,等. 长引水隧洞高水头大容量机组负荷调节特性优化[J]. 广东电力,2014,27(8):1-6.