

上游串联双调压室系统合理尺寸选择的研究

张 帅, 张晓宏, 张俊发

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为了研究上游串联双调压室系统(主调压室为阻抗式,副调压室为简单式)合理的主、副调压室尺寸,结合长引水隧洞水电站工程实例,采用水锤计算的特征线法,运用过渡过程软件建立模型,对压力引水系统过渡过程进行计算研究。分析了主、副调压室不同直径组合下的调压室最高涌浪水位、波动衰减率和蜗壳末端最大水锤压力的变化规律。研究表明:对于布置双调压室系统,随着副调压室直径增大,主调压室阻抗孔对水锤压力的影响减弱;阻抗孔直径有一个临界值点,低于该点,副调压室最高涌浪水位随阻抗孔直径的增加而降低,高于该点,则上升;若副调压室直径过大,则主、副调压室水位波动衰减较慢。研究结论对类似工程合理地选择主、副调压室直径有一定参考作用。

关键词: 上游串联双调压室; 调压室直径; 阻抗孔直径; 最高涌浪水位; 水位波动衰减率

中图分类号:TV732.5

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)04-0172-05

Research on the reasonable size selection of upstream series double surge chambers for hydropower station

ZHANG Shuai, ZHANG Xiaohong, ZHANG Junfa

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

Abstract: In order to study the reasonable size of the main and auxiliary surge chambers in the upstream series double surge chambers system (the main surge chamber is impedance type and the auxiliary surge chamber is simple type), the characteristic line method and the transition process software were used to calculate and study the transition process of the pressure water diversion system. The variation law of maximum surge water level, fluctuation attenuation rate and maximum water hammer pressure at the end of volute in different size combinations of main and auxiliary surge chambers were analyzed. The results showed that the influence of the impedance hole of the main surge chamber on the water hammer pressure decreased with the increase of the size of the auxiliary surge chamber when the double surge chambers system was arranged. The size of the impedance hole had a critical point below which the maximum surge water level of the auxiliary surge chamber decreases with the increase of the size of the impedance hole and rises above this point. The size of auxiliary surge chamber was too large and the fluctuation attenuation of double surge chambers was slow. The results are useful for similar projects to select reasonable sizes of the main and auxiliary surge chambers.

Key words: upstream series double surge chamber; surge chamber diameter; impedance hole diameter; maximum surge water level; fluctuation attenuation rate of water level

1 研究背景

具有超长引水隧洞的水电站,非恒定流时压力引水系统中的水能波动和水流惯性均较大^[1-5]。为

减小引水隧洞和压力管道的水锤压力,改善机组运行条件,常需设置调压室^[6-8]。若设置单调压室,则所需调压室的尺寸较大,且单调压室一般较靠近厂房,当厂房附近围岩节理裂隙发育、断裂和软弱结构

收稿日期:2019-01-03; 修回日期:2019-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51279162)

作者简介:张 帅(1992-),男,山西运城人,在读硕士研究生,研究方向为水电站水力过渡过程研究。

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研究。

面较多、岩性较差时,开挖单一大尺寸调压室不利于围岩稳定和结构安全。若在该调压室上游一定距离再布置一个辅助调压室,可有效解决这类施工问题及水力过渡过程问题^[9-12]。对于上游设置串联双调压室系统,文献[9-12]主要研究了主、副调压室的位置、面积变化对系统稳定性的要求等。本文结合具体的工程实例,重点研究上游串联双调压室系统(主调压室为阻抗式,副调压室为简单式)的调压室直径变化对主、副调压室最高涌浪水位、波动衰减率、蜗壳末端最大水锤压力和机组最大转速升高率的影响。进而分析得出上游串联双调压室系统合理的主、副调压室直径。

2 工程概况及研究方法

某水电站为径流引水式电站,工程规模为三等中型,主要任务是发电。上游水库校核洪水位为893.0 m,设计洪水位为891.5 m,正常蓄水位为891.5 m,下游水位为831.37 m。本工程引水发电系统主要由进水口、压力引水隧洞、调压室、压力管道等组成。引水隧洞为有压洞,长17.090 km,衬砌后直径为10.5 m。靠近厂房处围岩等级为Ⅲ、Ⅳ类,岩石强度较低,受地质条件限制,不利于在该处建单个大尺寸调压室。选择布置串联双调压室系统,主调压室采用阻抗式,在距离主调压室上游200 m处利用施工竖井建成副调压室,采用简单式。引水隧洞在主调压室下部通过岔洞分为3条压力支管,厂房内安装3台单机容量为38.3 MW的混流式水轮发电机组。

水电站引水发电系统用过渡过程计算软件模拟如图1所示,其中J1为上游水库,J3为副调压室(简单式),J4为主调压室(阻抗式)。主调压室J4下部通过岔洞分为3条压力支管,其后分别连接1台水轮发电机组,J8、J9、J10为3台水轮发电机组,导叶总关闭时间为10 s,采用直线关闭规律。J11、J12、J13为下游尾水。

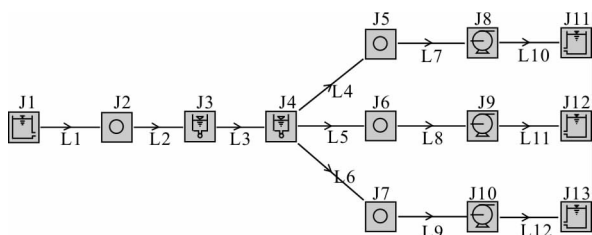


图1 某水电站引水发电系统仿真图

本文取副调压室J3、主调压室J4和机组J8为研究对象。计算工况取上库正常蓄水位891.5 m,

对应地取下游水位831.37 m。3台机组同时运行突甩额定负荷。 D_1 为J3处简单式调压室的直径, D_2 为J4处阻抗式调压室的直径, d 为主调压室阻抗孔直径。研究在主、副调压室位置一定的情况下,改变两个调压室的尺寸(即 D_1 、 D_2 和 d 的大小)对主、副调压室最高涌浪水位、波动衰减率、蜗壳末端最大水锤压力和机组最大转速升高率的影响。

3 结果与分析

根据有关文献[6,13-14],用爱文吉里斯特(Evangelisti)公式计算得出该上游串联双调压室临界稳定断面面积 F_{th} 为1 431 m²,同时考虑到工程规模、水电站并网运行、调速器的调节作用以及因地质条件限制尽可能减少对围岩的开挖,本文初步拟定主调压室直径为25、30、35 m,主调压室阻抗孔直径为3.2、3.6、4.0、4.4、4.8、5.2 m,副调压室直径为0、15、20、25、30 m。

3.1 主、副调压室直径变化与调压室最高涌浪水位的关系

主、副调压室直径变化对主调压室最高涌浪水位的影响见图2。

由图2可知,当 D_1 和 d 一定时,随着 D_2 增加,主调压室最高涌浪水位下降。由图2(a)可知,当 D_1 一定,随着 d 增加,主调压室最高涌浪水位升高。这是因为阻抗孔直径增大时,阻抗作用减小导致最高涌浪水位升高^[15-17]。当 D_1 变小甚至为0时,随着 d 增加,最高涌浪水位明显提升,但随着 D_1 变大,这一上升趋势明显减缓,说明副调压室的存在降低了主调压室的最高涌浪水位。图2(b)和2(c)也观察到相同的变化趋势。

主、副调压室直径变化对副调压室最高涌浪水位的影响见图3。

由图3可知,当 D_1 和 d 一定,随着 D_2 增加,副调压室最高涌浪水位下降;当 D_2 和 d 一定, D_1 越小,副调压室最高涌浪水位越高。由图3(a)可知,当 D_1 为15 m时,随着 d 增加,副调压室最高涌浪水位迅速下降, d 增加到4 m时,最高涌浪水位达到最小值, d 超过4 m后开始缓慢上升。这可以解释为:当 d 小于4 m时,可认为主调压室阻抗孔直径较小,其反射水锤波的效果较差,主调压室的穿室作用较强,透入副调压室的水锤压力较大,水锤压力对副调压室的涌浪水位起主要控制作用。当 d 从3.2 m增到4 m,主调压室的穿室作用减弱,透入副调压室的水锤压力减小,所以副调压室最高涌浪水位递减。当

d 大于 4 m 时,由于主调压室阻抗孔直径过大,水锤压力对副调压室的控制作用减弱,而主调压室对副调压室的控制作用加强,因主调压室的最高涌浪水位随阻抗孔直径的增加而上升,导致副调压室的涌浪水位有所上升。

从图 3(a)中 D_1 为 20、25 和 30 m 曲线也能观察到相同的变化趋势,只是不同的 D_1 ,折线图上最小值点对应的 d 的大小不一,随着 D_1 增加,最小值点对应的 d 值减小或者相近。图 3(b)和(c)中也能观察到上述变化趋势。

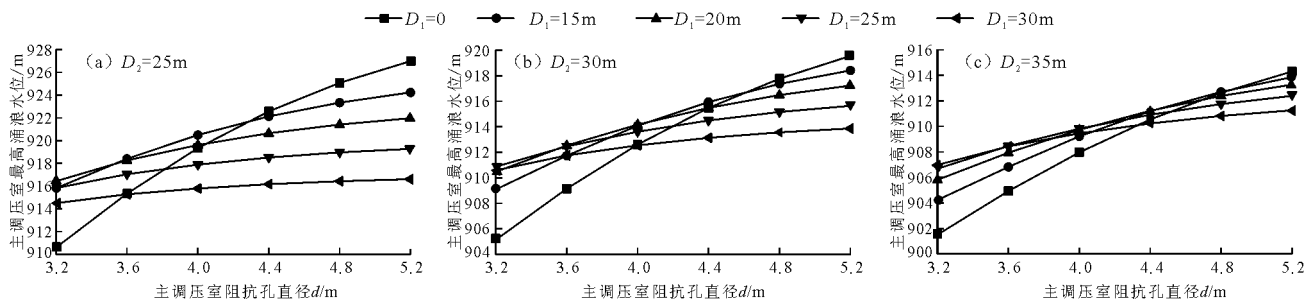


图 2 D_1 、 D_2 、 d 对主调压室最高涌浪水位的影响

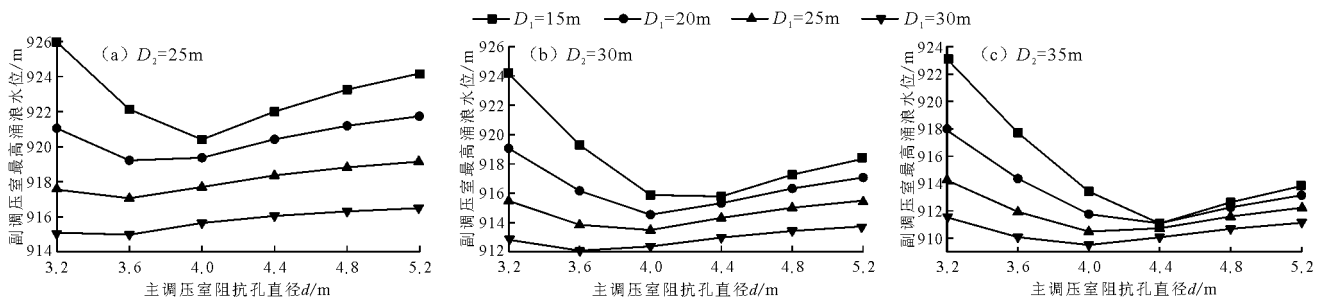


图 3 D_1 、 D_2 、 d 对副调压室最高涌浪水位的影响

3.2 主、副调压室直径变化与蜗壳末端最大水锤压力的关系

主、副调压室直径变化对蜗壳末端最大水锤压力的影响见图 4。

由图 4 可知,当 D_2 和 d 一定,随着 D_1 增加,蜗壳末端最大水锤压力逐渐减小。当 D_1 增加到一定程度时,阻抗孔直径变化对蜗壳末端最大水锤压力的敏感性减弱。这可以解释为,副调压室直径足够大时,对越过主调压室的水锤波足以充分反射,所以主调压室阻抗孔直径的大小对水锤压力的影响减弱。因

此,布置上游串联双调压室时,主调压室阻抗孔直径可以相对减小。

综合图 2、3 和 4,为了充分发挥副调压室降低涌浪水位、减小水锤压力以及阻抗孔减小调压室断面面积的作用,拟定副调压室直径 D_1 为 20 和 25 m,主调压室阻抗孔直径 d 为 3.6 和 4.0 m。

3.3 主、副调压室直径变化与调压室水位波动衰减率的关系

主、副调压室直径变化对调压室水位波动衰减率的影响见表 1。

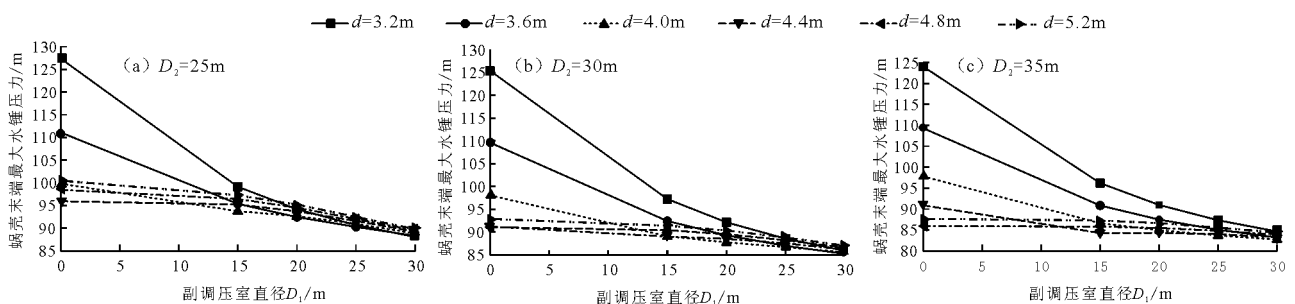


图 4 D_1 、 D_2 、 d 对蜗壳末端最大水锤压力的影响

由表 1 可知:(1)当 D_1 和 D_2 一定, d 越大,主、副调压室水位波动衰减率越小。因此对于上游串联双调

压室系统,相对较小的阻抗孔直径可以使得调压室涌浪水位有更快的衰减。(2)当 D_1 和 d 一定, D_2 越大,

主、副调压室的峰值越低,水位波动衰减率增加。所以主调压室直径不能过小,但过大的主调压室尺寸造成较大的开挖量,不利于围岩稳定和结构安全,所以拟定主调压室直径为 30 m。(3) 当 D_2 和 d 一定,随着 D_1 增加,主、副调压室水位波动衰减率减小。因此,较

大的副调压室直径不利于两个调压室的水位波动衰减。所以拟定副调压室直径为 20 m。

3.4 主调压室阻抗孔直径变化对特征参数的影响

主调压室阻抗孔直径变化时相应的各项特征数据见表 2。

表 1 D_1 、 D_2 、 d 与调压室水位波动衰减率的关系

副调压室 直径 D_1 /m	主调压室 直径 D_2 /m	主调压室阻抗 孔直径 d /m	副调压室水位			主调压室水位		
			第一峰值 Z_1 /m	第二峰值 Z_2 /m	δ /%	第一峰值 Z_1 /m	第二峰值 Z_2 /m	δ /%
20	25	3.6	919.22	904.14	44.15	918.26	904.21	42.19
		4.0	919.37	906.34	37.98	919.61	906.42	38.07
	30	3.6	916.16	899.96	52.09	912.53	900.01	45.41
		4.0	914.54	901.95	42.71	914.17	902.00	41.66
	35	3.6	914.36	897.39	57.92	907.94	897.42	45.78
		4.0	911.76	899.05	47.60	909.73	899.08	43.00
	25	3.6	917.06	904.95	37.84	917.04	905.03	37.44
		4.0	917.70	906.52	34.25	917.88	906.61	34.23
	30	3.6	913.85	900.90	44.98	912.46	900.98	41.75
		4.0	913.49	902.58	38.37	913.61	902.64	38.29
	35	3.6	911.93	898.14	51.32	908.46	898.19	43.70
		4.0	910.50	899.66	42.61	909.82	899.72	40.63

注: δ 为调压室水位波动衰减率, $\delta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 - Z_0} \times 100\%$, 其中 Z_0 为调压室初始水位, Z_1 为调压室水位第一个波峰值, Z_2 为调压室水位第二个波峰值。

表 2 主调压室阻抗孔直径变化相应的各项特征数据($D_1 = 30$ m, $D_2 = 20$ m)

特征参数	主调压室阻抗孔直径 d /m					
	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2
$Z_{1副}$ /m	919.06	916.16	914.54	915.32	916.32	917.07
$Z_{1主}$ /m	910.46	912.53	914.17	915.48	916.49	917.23
ΔZ_1 /m	8.60	3.63	0.37	0.16	0.17	0.16
$t_{1副}$ /s	125.64	133.34	161.66	223.42	228.02	231.28
$t_{1主}$ /s	218.76	219.7	222.96	229.12	232.72	234.80
Δt_1 /s	93.12	86.36	61.30	5.70	4.70	3.52
$\delta_{副}$ /%	62.35	52.09	42.71	38.47	35.89	33.83
$\delta_{主}$ /%	49.33	45.41	41.66	38.43	35.84	33.72
ζ	0.43	0.38	0.36	0.37	0.39	0.40
β /%	41.44	41.09	40.77	40.50	40.26	40.07

注: ΔZ_1 为主、副调压室最高涌浪水位之差的绝对值; t_1 为调压室达到最高涌浪水位所需的时间; Δt_1 为主、副调压室达到最高涌浪水位的时间差; δ 为调压室水位波动衰减率; ζ 为蜗壳末端最大水锤相对升压值; β 为机组最大转速升高率。

由表 2 可以看出,当 D_1 、 D_2 一定时:(1) 随着 d 增加,副调压室最高涌浪水位先降低后上升,主调压室最高涌浪水位逐渐上升。(2) 当 d 一定时, $t_{1副} < t_{1主}$,即副调压室最高涌浪水位比主调压室提前到达峰值。

当 d 增加时, ΔZ_1 减小, Δt_1 减小,即主、副调压室涌浪水位达到峰值的水位差减小、时间差缩短,尤其是 d 大于 4 m 时。这也验证了当阻抗孔直径过大时,阻抗的作用减小,副调压室的涌浪水位主要由主调压室影

响,因此当阻抗孔直径增加到一定值时,随着阻抗孔直径继续增大,副调压室涌浪水位降到最小值后会缓慢上升。(3)随着 d 增加,主、副调压室水位波动衰减率逐渐减小,蜗壳末端最大水锤相对升值先减小后增加,机组最大转速升高率逐渐减小。

当 d 超过 4 m 时, ΔZ_1 与 Δt_1 较小,即主、副调压室的水位波动频率相对一致,相互之间诱发共振的可能性较大;而当 d 小于 4 m 时,阻抗孔面积与有压引水隧洞断面面积比值低于 15%,而规范要求该比值合理区间为 15% ~ 30%^[6]。因此选择阻抗孔直径为 4 m。

综上所述,当主调压室(阻抗式)直径为 30 m、阻抗孔直径为 4 m、副调压室(简单式)直径为 20 m 时,既能减小主、副调压室尺寸,又能更好地反射水锤波,降低调压室最高涌浪水位,提高波动衰减率。该尺寸布置下,主、副调压室断面面积之和为 1 021 m²,该上游串联双调压室临近稳定断面面积 F_{th} 为 1 431 m²,所选双调压室断面面积之和为 F_{th} 的 71%,满足工程实际所需。

4 结 论

上游双调压室系统的水位波动稳定非常复杂,合理地选择主、副调压直径在调压室设计中至关重要。本文结合某水电站工程实例进行过渡过程计算,探讨了主、副调压室直径变化对上游串联双调压室压力引水系统的影响。得出结论如下:

(1)上游串联双调压室系统(主调压室为阻抗式,副调压室为简单式)随着主调压室直径增大,主、副调压室最高涌浪水位下降,波动衰减加快。随着副调压室直径增大,主调压室阻抗孔直径的大小对水锤压力的影响减弱,且不利于波动衰减。

(2)主调压室阻抗孔直径存在一个临界值,低于该值时,随着阻抗孔直径增大,副调压室最高涌浪水位迅速降低,且先于主调压室到达峰值;高于该值时,随着阻抗孔直径增大,副调压室最高涌浪水位缓慢上升,最终上升到与主调压室最高涌浪水位相近的位置,且主、副调压室涌浪水位达到峰值的时间差缩短。

(3)结果表明,该电站选取主调压室直径 30 m,主调压室阻抗孔直径 4 m,副调压室直径 20 m 是合

理的。

参考文献:

- [1] 王利卿. 水电站长引水管道过渡过程研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [2] 张 梁, 陈宏川. 水电站长距离引水隧洞水力过渡过程数值模拟研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(6): 70 - 77.
- [3] 余 平, 陈 鹏. 长隧道引水式“一洞双机”水电站运行方式研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(6): 150 - 153 + 157.
- [4] 焦云乔, 江春波, 孔庆蓉, 等. 长引水隧洞水电站小波动过渡过程影响因素研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(3): 158 - 163.
- [5] 郭文成, 杨建东, 陈一明, 等. 考虑压力管道水流惯性和调速器特性的调压室临界稳定断面研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 171 - 178.
- [6] 王仁坤, 张春生. 水工设计手册: 水电站建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [7] 王利卿, 马跃先, 原文林, 等. 管道长度与阻抗式调压室水击穿室系数的关系分析[J]. 河南科学, 2006, 24(1): 115 - 117.
- [8] 赵正飞, 张晓宏, 张彦航. 上游调压室设置公式的对比分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(3): 94 - 96 + 101.
- [9] 滕 毅, 杨建东, 郭文成, 等. 带上游串联双调压室电站水力-调速系统稳定性的研究[J]. 2015, 34(5): 72 - 79.
- [10] 李振轩, 鞠小明, 陈云良, 等. 上游串联双调压室系统小波动稳定性计算分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 103 - 106.
- [11] 陈 岚, 赖 旭, 邹 金. 上游串联双调压室系统稳定断面面积设计[J]. 水电能源科学学报, 2016, 34(4): 54 - 57.
- [12] GUO Wencheng, YANG Jiandong, TENG Yi. Surge wave characteristics for hydropower station with upstream series double surge tanks in load rejection transient[J]. Renewable Energy, 2017, 108: 488 - 501.
- [13] 王 洋, 王玲花. 水电站过渡过程研究历史及现状综述[J]. 吉林水利, 2014(9): 29 - 33.
- [14] 王明锋. 海甸峡水电站调压室稳定断面选定及其涌波计算[J]. 水利规划与设计, 2011(3): 44 - 46.
- [15] 童 祥, 张晓宏, 张俊发. 调压室阻抗孔尺寸选择的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 168 - 171 + 176.
- [16] 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.
- [17] 崔 忠. 长引水隧洞阻抗式调压室过渡过程分析[J]. 中国水运, 2013, 13(9): 218 - 219 + 221.