

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230372

含上、下游双调压室的抽水蓄能电站 小波动涌浪特性研究

龚 涛, 张 健, 王开朗

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究含上、下游双调压室的抽水蓄能电站小波动涌浪特性, 基于状态空间法推导了该布置类型的抽水蓄能电站小波动数学模型, 通过数值模拟求解上、下游调压室涌浪时域过程, 采用快速傅里叶变换(FFT)得到了上、下游调压室涌浪频域过程, 在不考虑调速系统和调压室系统发生水力耦合的情况下, 建立压力管道流量与调压室水位之间的传递函数, 进而得到了调压室系统幅频特性。结果表明, 上、下游调压室涌浪幅值最大时对应的输入信号频率与调压室系统固有频率相近, 调压室涌浪振荡频率对应机组转速尾波振荡频率; 调压室涌浪特性与调压室面积和输水隧洞水头损失系数密切相关, 增大两调压室面积可降低上、下游调压室涌浪的频率和幅值, 系统稳定性增强; 输水隧洞水头损失系数变化对上、下游调压室涌浪振荡频率无影响, 对上、下游调压室涌浪幅值影响较大, 且水头损失系数越大涌浪幅值越小, 系统稳定性越好。

关键词: 抽水蓄能电站; 上、下游双调压室; 小波动; 涌浪特性; 系统稳定性

中图分类号: TV732.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0118-05

1 引言

抽水蓄能电站作为清洁灵活的调节电源, 具有削峰填谷调相及提升电网对间歇性可再生能源消纳能力等作用, 因此抽水蓄能电站运行稳定对于电力系统的安全和供电品质有重要影响^[1]。调压室作为抽水蓄能电站中的重要组成部分, 在发生小波动后能对水力-机械-电气系统的波动起到调节作用, 使其达到新的稳定运行状态。但调压室水位波动也会给系统带来稳定性问题, 故研究小波动调压室涌浪特性对于指导抽水蓄能电站安全运行十分重要。WYLIE E B等^[2]通过研究设单调压室的水电站涌浪特性, 提出了调压室水位振荡周期解析公式; 刘畅等^[3]推导了长连接管与分流调压室稳定断面计算公式, 讨论了连接管和分流对调压室水位波动幅值、周期和衰减速度的影响; 付亮等^[4]通过研究设调压室水电站负荷扰动下机组频率波动过程, 推导出机组转速尾波波动方程; LIU Y等^[5]研究了设上游串联双调压室水电站的涌浪特性, 确定了调压室水位波动是基波和简谐波的叠加。本文通过推导出某含上、

下游双调压室的抽水蓄能电站小波动数学模型, 求解上、下游调压室涌浪和机组转速的时域过程, 利用FFT变换得到调压室涌浪频域过程, 分析了上、下游调压室系统的涌浪特性, 探讨了调压室面积和输水隧洞水头损失系数等对调压室涌浪特性的影响, 旨在为调压室系统设计及指导抽水蓄能电站安全运行提供参考。

2 抽水蓄能电站小波动数学模型

以某含上、下游双调压室的抽水蓄能电站为例(其布置简图见图1), 基于其输水发电系统布

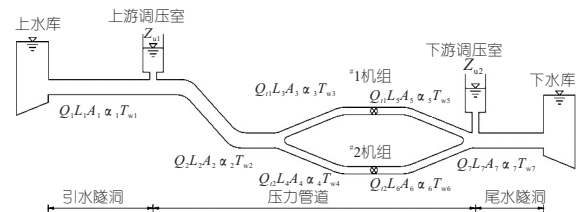


图1 某抽水蓄能电站#1水力单元输水发电系统布置简图
Fig. 1 Layout diagram of water transmission and power generation system of #1 hydraulic unit of a domestic pumped storage power station

收稿日期: 2023-03-14, 修回日期: 2023-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401810); 江苏省第五期“333工程”培养资金项目(BRA2018061)

作者简介: 龚涛(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水电站及泵站水力过渡过程, E-mail: 1240709498@qq.com

通讯作者: 张健(1970-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水电站及泵站水力学, E-mail: zhangjian@hhu.edu.cn

置形式推导小波动稳定分析的数学模型。图 1 中的 #1、#2 机组基本参数相同,即额定水头 481.0 m,额定流量 84.03 m³/s,额定功率 357.14 MW,额定转速 428.6 r/min。上、下游调压室大井直径分别为 14.0、13.0 m。其余管道参数见表 1。

表 1 输水系统管道参数

Tab.1 Pipeline parameters of water transmission system

管段 编号 <i>i</i>	<i>L_i</i> /m	<i>A_i</i> /m ²	<i>T_{wi}</i> /s	管段 编号 <i>i</i>	<i>L_i</i> /m	<i>A_i</i> /m ²	<i>T_{wi}</i> /s
1	783.50	45.20	0.69	5	187.00	21.31	0.18
2	668.90	23.50	1.02	6	187.00	21.31	0.18
3	102.84	7.67	0.25	7	1 586.80	41.83	1.41
4	102.84	7.67	0.25				

2.1 基于状态空间法的小波动数学模型推导

引水和尾水隧洞的水流动量方程分别为:

$$T_{w1}dq_1/dt = -z_{u1} - 2\alpha_1q_1Q_{1,0}^2/H_0 \quad (1)$$

$$T_{w7}dq_7/dt = z_{u2} - 2\alpha_7q_7Q_{7,0}^2/H_0 \quad (2)$$

其中 $q_i = (Q_i - Q_{i,0})/Q_{i,0}$
 $z_{uj} = (Z_{uj} - Z_{uj,0})/H_0$

式中, T_{wi} 为隧洞水流惯性时间常数; q_i 为隧洞流量变化相对值; z_{uj} 为调压室水位变化相对值; H_0 为初始稳态机组工作水头; α_i 为隧洞水损系数; Q_i 为隧洞流量; Z_{uj} 为调压室水位; 其余下标带“0”的表示变量初始稳态值。

经过 #1、#2 压力支管的水流动量方程分别为:

$$\frac{Q_{t1,0}}{g} \left(1 + \frac{a_2 + a_{t2}}{a_{t1}} \right) \frac{dq_{t1}}{dt} = a_2 H_0 (z_{u1} - z_{u2}) - 2a_2 h_{2,0} q_2 - (a_2 + a_{t2}) H_0 \xi_1 - 2(a_2 + a_{t2}) h_{t1,0} q_{t1} + a_2 H_0 \xi_2 + 2a_{t2} h_{t2,0} q_{t2} \quad (3)$$

$$\frac{Q_{t2,0}}{g} \left(1 + \frac{a_2 + a_{t1}}{a_{t2}} \right) \frac{dq_{t2}}{dt} = a_2 H_0 (z_{u1} - z_{u2}) - 2a_2 h_{2,0} q_2 - (a_2 + a_{t1}) H_0 \xi_2 - 2(a_2 + a_{t1}) h_{t2,0} q_{t2} + a_2 H_0 \xi_1 + 2a_{t1} h_{t1,0} q_{t1} \quad (4)$$

其中 $1/a_{t1} = L_3/A_3 + L_5/A_5$
 $1/a_{t2} = L_4/A_4 + L_6/A_6$; $1/a_2 = L_2/A_2$

式中, q_{ti} 、 q_2 分别为机组、压力主管流量变化相对值; $Q_{ti,0}$ 为初始稳态机组引用流量; $h_{2,0}$ 、 $h_{ti,0}$ 分别为初始稳态压力主管水头损失、压力支管总水头损失; ξ_i 为机组工作水头变化相对值。

上、下游调压室连续性方程分别为:

$$F_{u1} \frac{dz_{u1}}{dt} = \frac{Q_{1,0}}{H_0} q_1 - \frac{Q_{t1,0}}{H_0} q_{t1} - \frac{Q_{t2,0}}{H_0} q_{t2} \quad (5)$$

$$F_{u2} \frac{dz_{u2}}{dt} = \frac{Q_{t1,0}}{H_0} q_{t1} + \frac{Q_{t2,0}}{H_0} q_{t2} - \frac{Q_{7,0}}{H_0} q_7 \quad (6)$$

式中, F_{u1} 、 F_{u2} 分别为上、下游调压室大井面积。机组流量及出力方程分别为:

$$q_{ti} = s_1 \varphi_i + s_2 \mu_i + s_7 \xi_i \quad (7)$$

$$p_i = s_8 q_{ti} + s_9 \varphi_i + s_{10} \mu_i \quad (8)$$

其中 $\varphi_i = (n_i - n_{i,0})/n_{i,0}$; $\mu_i = (\tau_i - \tau_{i,0})/\tau_{i,0}$
 式中, s 为反映水轮机特性的参数^[6]; φ_i 为机组转速变化相对值; μ_i 为机组导叶开度变化相对值; n_i 为机组转速; τ_i 为机组导叶开度相对值。

机组运动方程为:

$$T_a d\varphi_i/dt = p_i - x_i - S_p \varphi_i \quad (9)$$

其中 $x_i = (X_i - X_{i,0})/X_{i,0}$

式中, T_a 为机组惯性时间常数; S_p 为负荷自调节系数; x_i 为负荷扰动变化相对值。

水轮机调速器方程为:

$$T_d b_t d\mu_i/dt + b_p \mu_i = -T_d d\varphi_i/dt - \varphi_i \quad (10)$$

式中, b_p 、 b_t 、 T_d 分别为调速器的永态转差系数、暂态转差系数、缓冲时间常数。

由式(1)~(10)建立图 1 中的抽水蓄能电站小波动下水力-机械-调节系统线性微分方程组,得到描述系统状态变量的状态矩阵方程为:

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{M}\mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{X} = [\varphi_1, \varphi_2, \mu_1, \mu_2, q_{t1}, q_{t2}, q_1, q_5, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

式中, \mathbf{X} 、 \mathbf{M} 、 \mathbf{N} 分别为系统的状态变量、状态矩阵、扰动向量。

通过求解矩阵 \mathbf{M} 的特征值 λ 可判断小波动下系统的稳定性,当全部特征值实部小于 0 时系统保持稳定^[7]。基于四阶龙格库塔法求解式(11)可得到小波动下系统的振荡时域过程。

2.2 上、下游调压室系统的传递函数推导

在图 1 中,如果不考虑由水轮发电机组-调速器-压力管道组成的调速系统和由输水隧洞-调压室组成的调压室系统之间发生水力耦合的情况下,由式(1)、(5)和式(2)、(6)得到上、下游调压室系统的传递函数。

对于上游调压室系统,将式(1)、(5)进行拉普拉斯变换:

$$T_{w1}Q_1(s)s = -Z_{u1}(s) - 2\alpha_1Q_1(s)Q_{1,0}^2/H_0 \quad (12)$$

$$F_{u1}Z_{u1}(s)s =$$

$$\frac{Q_{1,0}}{H_0}Q_1(s) - \frac{Q_{t1,0}}{H_0}Q_{t1}(s) - \frac{Q_{t2,0}}{H_0}Q_{t2}(s) \quad (13)$$

式中, s 为拉普拉斯算子。

由式(12)、(13)导出调压室水位与压力管道流量两者的传递函数 $G_1(s)$:

$$G_1(s) =$$

$$\frac{Z_{u1}(s)}{Q_2(s)} = -\frac{Q_{1,0}T_{w1}s + 2\alpha_1Q_{1,0}^3}{Q_{1,0} + F_{u1}T_{w1}s^2 + 2\alpha_1Q_{1,0}^2F_{u1}s} \quad (14)$$

其中 $Q_{1,0} + F_{u1}T_{w1}s^2 + 2\alpha_1Q_{1,0}^2F_{u1}s = 0$ 为上

游调压室系统的特征方程,求解方程极点可得到调压室系统的固有角频率 ω_{n1} 。令 $s = \omega_1 j$,代入式(14)得到调压室系统幅频特性。

$$\omega_{n1} = \sqrt{Q_{1,0} T_{w1} F_{u1} - \alpha_1^2 Q_{1,0}^4 F_{u1}^2} / (F_{u1} T_{w1}) \quad (15)$$

$$|G_1(s)| =$$

$$\sqrt{(a_0 b_0 + a_1 b_1)^2 + (a_0 b_1 - a_1 b_0)^2} / (b_1^2 + b_0^2) \quad (16)$$

其中 $a_0 = -Q_{1,0} T_{w1} \omega_1$; $a_1 = -2\alpha_1 Q_{1,0}^3$

$$b_0 = 2\alpha_1 Q_{1,0}^2 F_{u1} \omega_1; b_1 = Q_{1,0} - F_{u1} T_{w1} \omega_1^2$$

下游调压室系统的传递函数求解过程与上游调压室系统相似。下游调压室系统固有角频率 ω_{n2} 、幅频特性分别为:

$$\omega_{n2} = \sqrt{Q_{7,0} T_{w7} F_{u2} - \alpha_7^2 Q_{7,0}^4 F_{u2}^2} / (F_{u2} T_{w7}) \quad (17)$$

$$|G_2(s)| =$$

$$\sqrt{(c_0 d_0 + c_1 d_1)^2 + (c_0 d_1 - c_1 d_0)^2} / (d_1^2 + d_0^2) \quad (18)$$

其中 $c_0 = -Q_{7,0} T_{w7} \omega_2$; $c_1 = 2\alpha_7 Q_{7,0}^3$

$$d_0 = 2\alpha_7 Q_{7,0}^2 F_{u2} \omega_2; d_1 = Q_{7,0} - F_{u2} T_{w7} \omega_2^2$$

由式(16)、(18)求出上、下游调压室系统在输入信号作用下输出信号(调压室涌浪)与输入信号(压力管道流量)幅值比相对于频率的关系,进而可研究抽水蓄能电站发生小波动时的调压室涌浪特性。

3 结果与分析

3.1 上、下游调压室涌浪特性分析

#1、#2 机组以额定水头、额定流量和额定出力运行,均受到 5% 负荷扰动,水轮机调速器参数 b_p 、 b_t 、 T_d 分别为 0、0.5、6.0 s。将表 1、调速器参数及机组初始稳态值代入式(11)中,求解系统受负荷扰动后的上、下游调压室涌浪和机组转速时域过程,见图 2(a)~(c)。

由图 2(a)~(c)可知,受扰系统振荡衰减且保持稳定,机组转速时域过程存在明显的主波和尾波,主波出现在转速振荡初始阶段,呈高频且快速衰减的特性,在经过调速器调节后,尾波呈低频且衰减慢的特性。相比于机组转速时域过程,上、下游调压室涌浪时域过程不存在明显的主波和尾波之分,且时域过程相似,整个过程低频振荡且逐渐衰减保持稳定,可知调压室涌浪时域过程不受调速器调节的影响。为进一步研究系统在受扰动后的上、下游调压室涌浪和机组转速振荡的幅频特性,将图 2(a)~(c)中的时域过程采用 FFT 变换后得到受扰系统的频域过程,见图 2(d)~(f)。

图 2(d)~(f)中的横坐标表示将系统时域过

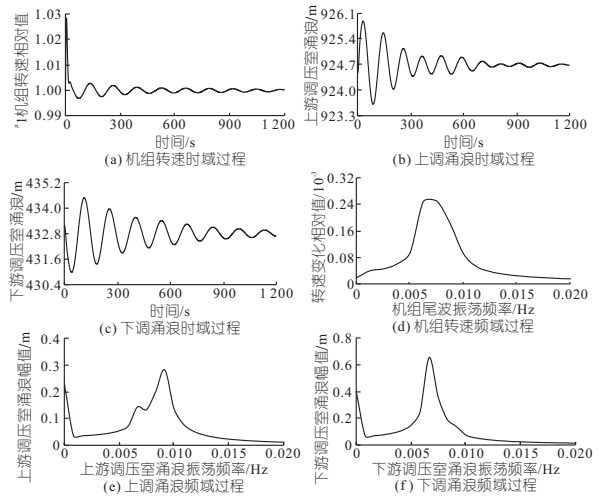


图 2 受 5% 负荷扰动下的系统时域、频域过程
Fig. 2 System time-domain and frequency-domain process under 5% load disturbance

程分解成若干三角函数时各三角函数所对应的频率;纵坐标表示各频率对应的幅值,其值越大表示原时域过程线越接近该频率下的三角函数。图 2(d)~(f)中最高幅值对应的频率分别为 0.007 5、0.009 2、0.006 7 Hz,故机组转速尾波及上、下游调压室涌浪振荡角频率分别为 0.047、0.057、0.042 rad/s。

同时在不考虑两系统之间发生水力耦合的情况下,通过式(16)、(18)可得到两调压室系统的幅频特性,见图 3。由图 3 可知,当输入信号角频率分别为 0.057、0.043 rad/s 时,上、下游调压室系统的输出信号强度最大。利用式(15)、(17)求得上、下游调压室系统的固有角频率分别为 0.057、0.043 rad/s,可知当输入信号角频率 ω 与调压室系统的固有角频率 ω_n 相等时,调压室系统输出信号强度最大,此时可认为输入信号与调压室系统振荡发生共振。结合图 2(d)~(f)中受扰后的系统频域过程,上、下游调压室涌浪幅值达到最大

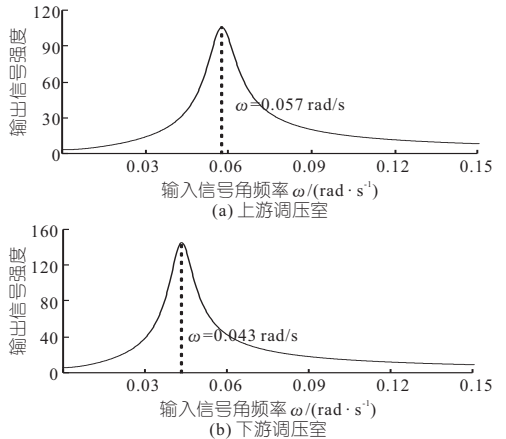


图 3 上、下游调压室系统幅频特性
Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of upper and downstream surge chamber systems

时,对应的角频率与调压室系统的固有频率一致,验证了分析的正确性。

3.2 调压室面积对调压室涌浪特性影响

保持机组运行工况、管道参数及调速器参数不变,选取不同的上、下游调压室面积,通过式(11)求解调压室涌浪时域过程,采用 FFT 变换后得到不同调压室面积下的涌浪频域过程,进而研究调压室面积对涌浪特性的影响。

图 4(a)为不同上调面积下的涌浪时域过程。由图 4(a)可知,当上调面积为 $0.35F_{u1}$ 时,系统受到 5% 负荷扰动后,上调涌浪振荡过程逐渐发散,系统失稳。通过 FFT 变换后得到此时上调涌浪振荡频率为 0.015 Hz,系统以高频率振荡发散。随着上调面积增大,上调涌浪振荡幅值和振荡次数逐渐减小,涌浪衰减速度变快,系统稳定性增强。图 4(b)为经过 FFT 变换得到的上调涌浪频域过程。由图 4(b)可知,随着调压室面积增大,涌浪振荡频率由 0.012 5 Hz 降至 0.007 5 Hz,相对应的系统振荡幅值由 0.811 m 降至 0.230 m。

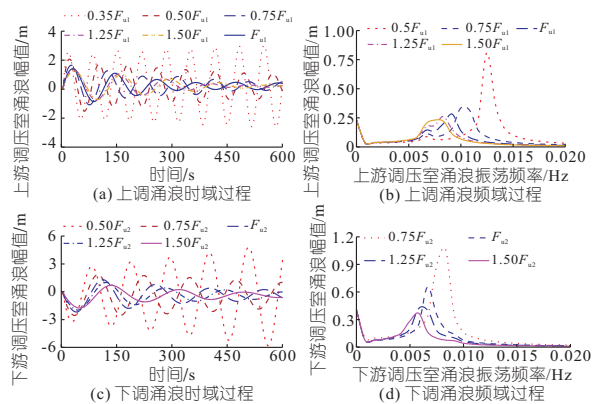


图 4 不同调压室面积下的涌浪时域、频域过程

Fig. 4 Time-domain and frequency-domain process of surge wave under different surge chamber areas

图 4(c)为不同下调面积下的涌浪时域过程。由图 4(c)可知,当下调面积为 $0.50F_{u2}$ 时,下调涌浪振荡频率为 0.009 2 Hz,系统逐渐振荡发散。随着下调面积逐渐减小,由下调涌浪时域过程可看出此时的下调涌浪振荡衰减速度减慢,振荡幅值增加。图 4(d)为系统受负荷扰动后的下调涌浪频域过程。由图 4(d)可知,下调面积减小时,涌浪振荡频率从 0.005 8 Hz 增至 0.008 3 Hz,涌浪幅值从 0.40 m 增至 1.07 m,系统稳定性逐渐变差。

综上分析,增加上、下游调压室面积对小波动涌浪特性影响相似,随着调压室面积的增加,上、下游调压室涌浪振荡频率和幅值逐渐降低,振荡衰减加快,小波动下系统的稳定性增强。同时由

图 4 可知,当调压室面积增加到一定时,对调压室涌浪特性影响效果不明显,故在调压室面积设计时,应综合考虑选择合理的调压室面积。

3.3 水损系数对调压室涌浪特性影响

保持机组运行工况和其他参数不变,改变上、下游输水隧洞的水头损失系数,通过求解式(11)得到不同水损系数下的调压室涌浪时域过程,利用 FFT 转换成频域过程,进而研究不同输水隧洞水损系数下的调压室涌浪特性。

图 5(a)为不同输水隧洞水损系数下的上调涌浪时域过程。由图 5(a)可知,改变引水隧洞水损系数对于调压室涌浪幅值影响较大,水损系数增大,上调涌浪幅值逐渐减小,振荡程度减缓,系统衰减加快;图 5(b)为经过 FFT 变换得到的上调涌浪频域过程。由图 5(b)可知,随着水损系数增大,上调涌浪振荡频率和振荡周期几乎不发生变化,上调涌浪振荡幅值从 0.77 m 降至 0.16 m,系统稳定性增强。图 5(c)为不同尾水隧洞水损系数的下调涌浪时域过程。由图 5(c)可知,减小尾水隧洞水损系数,下调涌浪幅值逐渐增大,当水损系数为 $0.5\alpha_7$ 时,下调涌浪接近等幅振荡;图 5(d)为不同尾水隧洞水损系数的下调涌浪频域过程。由图 5(d)可知,改变水损系数对于下调涌浪振荡频率和周期无影响,下调涌浪振荡幅值随损失系数增大而减小,涌浪幅值从 1.86 m 减至 0.37 m。

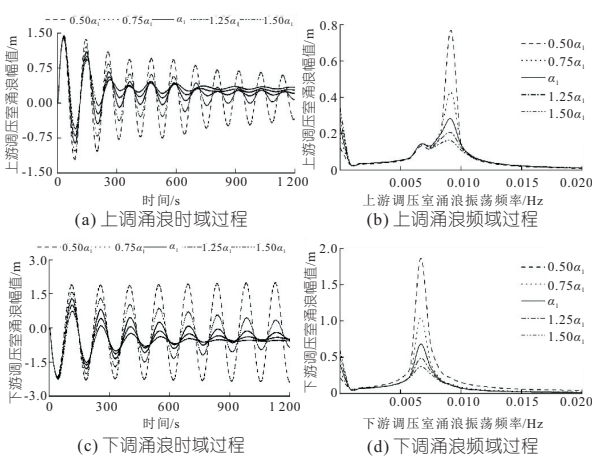


图 5 不同输水隧洞水损系数下的调压室涌浪时域、频域过程

Fig. 5 Time-domain and frequency-domain process of surge wave under different water loss coefficients of water delivery tunnel

综合可知,改变输水隧洞水损系数对于调压室涌浪振荡周期和振荡频率无影响,对于调压室涌浪幅值影响较大。增大输水隧洞水损系数,小波动调压室涌浪幅值减小,振荡衰减加快,系统稳定性增强。

4 结 论

a. 将系统时域过程进行 FFT 变换后可准确反映出小波动下调压室涌浪幅频特性。上、下游调压室涌浪幅值最大时对应的输入信号频率与调压室系统的固有频率相等,两调压室涌浪振荡频率对应着机组转速尾波振荡频率。

b. 调压室涌浪特性与上、下游调压室面积密切相关,增大上、下游调压室面积,调压室涌浪幅值和振荡频率逐渐减小,系统振荡衰减速度加快,有利于系统稳定性。

c. 上、下游调压室涌浪振荡频率和周期与输水隧洞水损系数无关,减小引水或尾水隧洞水损系数,调压室涌浪幅值逐渐增大,系统衰减速度变慢,系统振荡稳定性降低。

参 考 文 献:

[1] 曹明良. 抽水蓄能电站在我国电力工业发展中的重

要作用[J]. 水电能源科学,2009,27(2):212-214.

[2] WYLIE E B, STREETRE V L, SUO L S. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

[3] 刘畅,程永光. 长连接管和分流调压室的波动稳定和衰减特性[J]. 水电能源科学,2012,30(2):131-135.

[4] 付亮,杨建东,鲍海艳,等. 设调压室水电站负荷扰动下机组频率波动研究[J]. 水利学报,2008(11):1190-1196.

[5] LIU Y, ZHANG J, LIU Z, et al. Surge wave characteristics for hydropower plant with upstream double surge tanks connected in series under small load disturbance[J]. Renewable energy, 2022, 186(C): 667-676.

[6] 索丽生. 设置上下游双调压室的水力-机械系统的小波动稳定分析[J]. 华东水利学院学报, 1984(4): 33-43.

[7] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第6版. 北京:科学出版社, 2013.

Study on Surge Wave Characteristics of Pumped Storage Power Station with Upstream and Downstream Double Surge Chambers Under Small Fluctuations

GONG Tao, ZHANG Jian, WANG Kai-lang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the surge wave characteristics of pumped storage power station with upstream and downstream surge chambers under small fluctuations, the mathematical model of small fluctuations in a pumped storage power station with this type of arrangement was derived based on the state-space method. The time-domain process of surge wave in the upstream and downstream surge chambers was solved by numerical simulation. The frequency-domain process of surge wave in the upstream and downstream surge chambers was obtained by the fast Fourier transform (FFT). Without considering the hydraulic coupling between the speed regulating system and the surge chamber system, the transfer function between the pressure pipeline flow and the water level of the surge chamber was established to obtain the amplitude-frequency characteristics of the surge chamber systems. The results show that the input signal frequency corresponding to the maximum amplitude of the surge wave in the upstream and downstream surge chambers is similar to the natural frequency of the surge chamber system, and the surge wave oscillation frequency in the surge chamber corresponds to the tail wave oscillation frequency of the unit speed. The surge wave characteristics of the surge chamber are closely related to the area of the surge chamber and the head loss coefficient of the water delivery tunnel. Increasing the area of two surge chambers can reduce the frequency and amplitude of surge wave in the upstream and downstream surge chambers, and enhance the stability of the system. The variation of head loss coefficient of the tunnel has no impact on the oscillation frequency of surge wave in the upstream and downstream surge chambers, but has a great impact on surge wave amplitude in the upstream and downstream surge chambers. The larger the head loss coefficient is, the smaller surge amplitude is, the system stability is better.

Key words: pumped storage power station; upstream and downstream double surge chambers; small fluctuation; surge wave characteristics; stability of system