

室前分岔布置的长廊形引水调压室涌波特性

许冬宇¹,周建旭¹,马 朵²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:基于有压输水系统水力瞬变流理论的特征线法,分别推导了描述室前分岔布置的长廊形引水调压室水力特性的简化模型和精细模型,构建了相应的输水发电系统水力过渡过程计算分析模型,着重研究不对称运行条件下调压室的涌波特性、局部流态及其对调节保证计算的影响。计算结果表明,相较于简化模型,精细模型可准确描述长廊形引水调压室的水力特性,在得到调压室涌波极值和调节保证计算参数的同时,能够准确反映不对称运行条件下调压室水位波动的衰减特性;长廊形引水调压室在机组不对称运行条件下内部水流存在明显的纵向流动,在一定条件下会影响系统的水力振荡特性及其稳定性。

关键词:输水发电系统;水力过渡过程;调压室;涌波特性;特征线法;数学模型

中图分类号:TV732.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0009-07

Surge wave characteristics of a corridor-shaped water-diversion surge chamber with bifurcation layout upstream//
XU Dongyu¹, ZHOU Jianxu¹, MA Duo²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the method of characteristics for hydraulic transient analysis in pressurized water conveyance systems, both simplified and refined mathematical models were derived to characterize the hydraulic behavior of a corridor-shaped water-diversion surge chamber with bifurcation layout upstream. Corresponding computational models for the hydraulic transition process of the water conveyance and hydropower systems were established, with a focus on investigating the surge wave characteristics, local flow regime, and their impacts on regulation guarantee calculations under asymmetric operation conditions. The computational results show that compared with the simplified model, the refined model can accurately describe the hydraulic characteristics of the corridor-shaped surge chamber. While obtaining the extreme values of surge waves and parameters for regulation guarantee calculations, the refined model precisely captures the attenuation characteristics of water level fluctuations in the surge chamber under asymmetric operation conditions. Under asymmetric operation conditions of the units, significant longitudinal flows occur within the corridor-shaped surge chamber, which may affect the hydraulic oscillation characteristics and stability of the system under certain conditions.

Key words: water conveyance and hydropower system; hydraulic transient process; surge chamber; surge wave characteristics; method of characteristics; mathematical model

随着水电站装机容量的增大,输水发电系统日趋多样化,较多水电站采用多机共用调压室的布置形式,以满足输水系统局部水力优化^[1-3]、水力-机械系统调节保证计算^[4-5]和运行稳定性的要求^[6-10]。多机共用调压室的输水发电系统过渡过程计算边界条件复杂,且当机组不对称运行时,各支路的水力参数也是不对称的^[11-13],对相应机组的运行调控提出了更精细的要求。基于特征线法构建输水发电系统水力过渡过程计算分析模型时,调压室作为重要的水力边界,其建模的准确性直接影响系统局部的瞬变流特性和调压室的涌波特性,故需准确模拟多机

共用调压室的水力特性,研究调压室的局部流态、涌波特性及其对调节保证计算的影响,尤其是研究不对称运行条件下室前分岔布置的长廊形引水调压室阻抗孔和各支管的瞬时流量及其变化趋势,阐明其对调压室涌波特性的影响。

近年来关于多机共用调压室的水力特性研究取得了较为丰富的成果。朱峰等^[11]结合试验和数值模拟分析了双机共用尾水调压室底部流速分布、水头损失系数和阻抗孔进/出流量的变化规律;于桂亮^[12]结合试验观测及双机共用尾水调压室内水流流态的三维模拟,分析了单台机组和双台机组稳定

运行工况下调压室的局部流态;廖翔等^[13]开展水工模型试验,研究了流量比、阻抗孔面积和运行机组台数对双机共用调压室局部阻力系数的影响,结果表明水流进/出调压室的阻力系数随着流量比的增大和阻抗孔面积的减小而增大;蔡付林等^[14]开展两机共用的尾水调压室水力特性试验,研究发现调压室的水头损失系数是一个与流量比相关的变量;胡明等^[15]研究了溪洛渡水电站在“三机一室一洞”的典型尾水系统布置条件下的水力特性,如尾水调压室底部流道不同交汇方案对水力特性的影响等;程永光等^[16]研究表明多机共用尾水调压室底部管道的交汇形式对调压室布置、流态和水头损失有重要影响,验证了 CFD 数值模拟方法的准确性;华富刚等^[17]运用 CFD 数值模拟方法,揭示了某抽水蓄能电站尾水调压室内流场速度及压力分布规律,验证了 CFD 数值模拟方法在调压室水力优化设计中的适用性;俞晓东等^[18]建立了采用室后交汇形式的尾水调压室引水发电系统过渡过程计算模型,分析此类调压室阻抗孔面积等参数对过渡过程的影响;黄静等^[19]采用三维数值模拟方法研究了底部设置隔壁式岔管的调压室的复杂水力特性,结果表明水流全部流进/出调压室的流量系数总体介于 0.6~0.8 之间,与规范建议值一致。

综上,以往研究多针对室外分岔布置的长廊形引水调压室,主要通过模型试验和数值模拟方法开展系统的水力特性分析,或者将室外分岔布置的长廊形引水调压室简化为单一阻抗孔的调压室开展涌波特性的数值分析,而开展精确建模并分析调压室局部流态等水力特性的研究较少。为此,本文针对室前分岔布置的长廊形引水调压室,建立相应的调压室涌波分析精细模型,分析复杂边界条件下系统的瞬变流特性,特别是对称运行条件下调压室的涌波特性、局部流态及其对调节保证计算的影响。

1 模型构建

1.1 有压输水系统特征线法

在单一的有压输水管道中,若已知计算断面 i 及其相邻断面 $i-1$ 和 $i+1$ 在前一时刻的测压管水头和流量,可利用特征线法求出计算断面 i 在当前时刻的测压管水头和流量,相应的特征线方程为

$$C^+: H_{Pi} = C_P - B_P Q_{Pi} \quad (1)$$

$$C^-: H_{Pi} = C_M + B_M Q_{Pi} \quad (2)$$

其中 $C_P = H_{i-1} - \frac{a}{gA} Q_{i-1}$ $B_P = \frac{a}{gA} + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} |Q_{i-1}|$

$$C_M = H_{i+1} - \frac{a}{gA} Q_{i+1} \quad B_M = \frac{a}{gA} + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} |Q_{i+1}|$$

式中: H_{Pi} 、 Q_{Pi} 分别为计算断面 i 在当前时刻的测压管水头和流量; H_{i-1} 、 H_{i+1} 分别为计算断面 $i-1$ 、 $i+1$ 在前一时刻的测压管水头; Q_{i-1} 、 Q_{i+1} 分别为计算断面 $i-1$ 、 $i+1$ 在前一时刻的流量; a 为水锤波速; g 为重力加速度; A 为过水断面面积; f 为摩擦系数; Δx 为计算管段分段长度; D 为管道直径。

1.2 调压室不同水力边界建模方案

1.2.1 调压室简化模型

对于在分岔点设置单一阻抗孔的调压室布置形式,可将调压室与分岔点联合建立调压室简化模型(以下简称简化模型)。通常,在“一管多机”或“一洞多机”输水发电系统中,调压室与分岔点分离,设置多个闸门孔口兼作阻抗孔,这种布置形式的调压室水力边界亦可采用简化模型,此时,阻抗孔面积为多个闸门孔口面积之和,且阻抗孔位于底部分岔点。图 1 为该布置形式下调压室及岔管局部布置示意图。由压力管道水头平衡和流量连续条件,得出该类调压室水力边界模型,需要求解 9 个未知量。特征线方程及流量连续条件方程、水头平衡条件方程见式(3)~(9)。

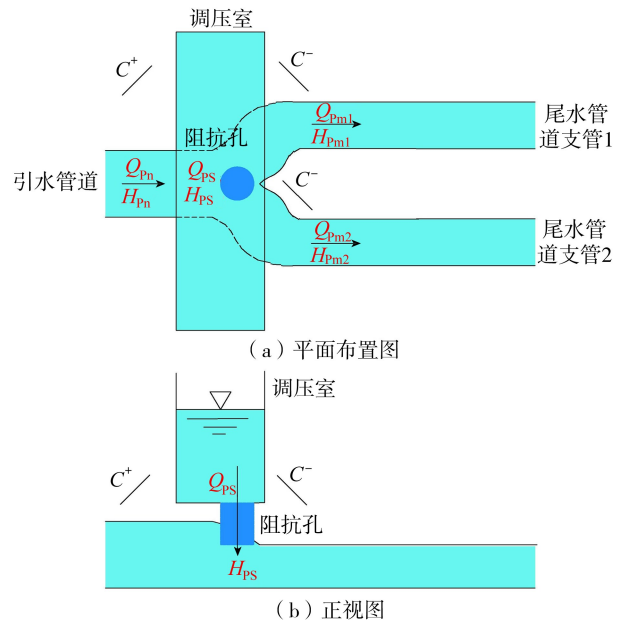


图 1 单一阻抗孔的调压室

$$C^+: H_{Pn} = C_P - B_P Q_{Pn} \quad (3)$$

$$C^-: H_{Pm1} = C_{M1} + B_{M1} Q_{Pm1} \quad (4)$$

$$C^-: H_{Pm2} = C_{M2} + B_{M2} Q_{Pm2} \quad (5)$$

$$H_{Pn} = H_{Pm1} = H_{Pm2} = H_P \quad (6)$$

$$H_P = H_{Ps} + R_S |Q_{Ps}| \quad (7)$$

$$Q_{Pn} = Q_{Pm1} + Q_{Pm2} + Q_{Ps} \quad (8)$$

$$A_S dH_{Ps}/dt = Q_{Ps} \quad (9)$$

式中: H_{Pn} 、 H_{Pm1} 、 H_{Pm2} 分别为调压室上游引水管道末端断面、下游尾水管道支管 1 和支管 2 的进口断面

的测压管水头; Q_{Pn} 、 Q_{Pm1} 、 Q_{Pm2} 分别为调压室上游引水管道末端断面、下游尾水管道支管 1 和支管 2 的进口断面的测压管水头; C_{Pn} 、 B_{Pn} 、 C_{M1} 、 B_{M1} 、 C_{M2} 、 B_{M2} 均为计算所得已知量; H_p 为调压室底部测压管水头; H_{PS} 为调压室水位; R_s 为水流进/出调压室的阻抗损失系数; Q_{PS} 为流进/出调压室的流量, 以流进时为正; A_s 为调压室面积; t 为时间。

1.2.2 考虑底部并列支管和多阻抗孔的调压室精细模型

图 2 所示输水发电系统引水调压室采用室前分岔布置形式, 即两台机组共用一个调压室, 调压室位于岔管之后, 其底部设置两个阻抗孔, 分别与各支管相连。据此构建考虑底部并列支管和多阻抗孔的调压室精细模型 (以下简称精细模型), 需要求解 14 个未知量。

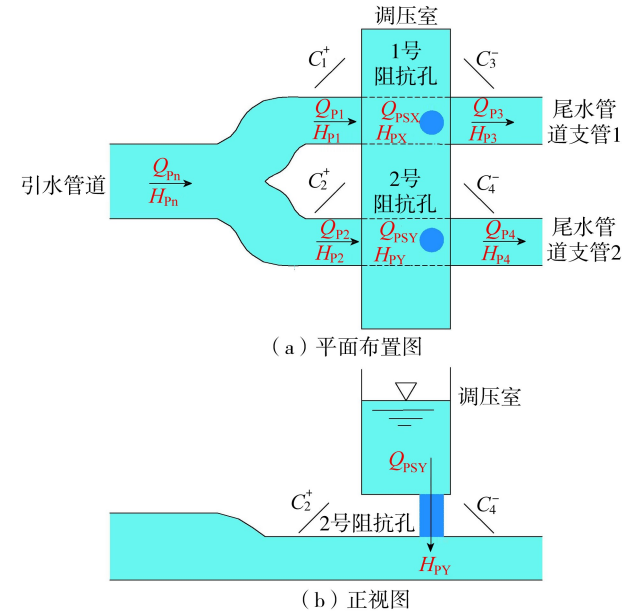


图 2 考虑底部并列支管和多阻抗孔的调压室

流量连续条件:

$$Q_{PS} = Q_{PSX} + Q_{PSY} \quad (10)$$

$$Q_{P1} = Q_{P3} + Q_{PSX} \quad (11)$$

$$Q_{P2} = Q_{P4} + Q_{PSY} \quad (12)$$

式中: Q_{PSX} 、 Q_{PSY} 分别为水流进/出 1 号和 2 号两阻抗孔的流量; Q_{P1} 为 1 号阻抗孔上游支管出口断面的流量; Q_{P3} 为 1 号阻抗孔下游支管进口断面的流量; Q_{P2} 为 2 号阻抗孔上游支管出口断面的流量; Q_{P4} 为 2 号阻抗孔下游支管进口断面的流量。

水头平衡条件:

$$H_{PX} = H_{PS} + R_{SX} |Q_{PSX}| Q_{PSX} \quad (13)$$

$$H_{PY} = H_{PS} + R_{SY} |Q_{PSY}| Q_{PSY} \quad (14)$$

$$H_{PX} = H_{P1} = H_{P3} \quad (15)$$

$$H_{PY} = H_{P2} = H_{P4} \quad (16)$$

式中: H_{PX} 、 H_{PY} 分别为 1 号和 2 号两阻抗孔底部的

测压管水头; R_{SX} 、 R_{SY} 分别为水流进/出 1 号和 2 号两阻抗孔的水头损失系数; H_{P1} 、 H_{P3} 分别为 1 号阻抗孔前、后断面的测压管水头; H_{P2} 、 H_{P4} 分别为 2 号阻抗孔前、后断面的测压管水头。

特征线方程:

$$C_1^+ : H_{P1} = C_{P1} - B_{P1} Q_{P1} \quad (17)$$

$$C_2^+ : H_{P2} = C_{P2} - B_{P2} Q_{P2} \quad (18)$$

$$C_3^- : H_{P3} = C_{M3} + B_{M3} Q_{P3} \quad (19)$$

$$C_4^- : H_{P4} = C_{M4} + B_{M4} Q_{P4} \quad (20)$$

式中 C_{P1} 、 B_{P1} 、 C_{P2} 、 B_{P2} 、 C_{M3} 、 B_{M3} 、 C_{M4} 、 B_{M4} 均为计算所得已知量。

调压室水位波动方程:

$$H_{PS} = H_{PS0} + (Q_{PS} + Q_{PS0}) \Delta t / 2A_s \quad (21)$$

式中: H_{PS0} 为前一时步的调压室水位; Q_{PS0} 为前一时步流进/出调压室的流量; Δt 为计算时步。

1.3 输水发电系统水力过渡过程计算分析模型

基于有压输水系统特征线法, 推导得到输水系统特征管段以及引水调压室水力边界方程, 结合水轮机模型特性曲线的离散数据, 建立水电站输水发电系统水力过渡过程计算分析模型, 其中引水调压室水力边界采用两种不同的建模方案, 简化模型将调压室与分岔点联合且阻抗孔位于分岔点处; 精细模型将调压室置于分岔点下游, 且分岔点后两个支管分设阻抗孔连接调压室。简化模型将调压室底部的多个阻抗孔合并成一个阻抗孔, 忽略了阻抗孔的数量及其分布对调压室局部水力特性的影响, 而精细模型准确考虑了调压室局部阻抗孔和支管的布置特性, 其数学模型较简化模型复杂, 但能够揭示阻抗孔数量及布置对调压室局部水流流态的影响, 有利于分析调压室局部水力特性以及调压室内纵向流动特性, 亦能验证简化模型的合理性。

2 调压室不同水力边界模型水力过渡过程对比

2.1 算例概况

某水电站输水发电系统采用“一洞两机”布置方式, 系统包括进洞口、引水主洞、引水调压室、引水支管和尾水管道, 其中引水调压室采用长廊形阻抗式调压室, 两个支路闸门孔口兼作阻抗孔, 见图 3。引水主洞、引水支管、尾水管道长度分别为 1898.80、210.78、47.60 m, 当量直径分别为 15.00、9.60、10.12 m, 长廊形引水调压室大井面积为 2400 m², 阻抗孔面积为 47.26 m²。机组额定水头为 64 m, 额定功率为 235.9 MW, 额定流量为 404.15 m³/s, 额定转速为 100 r/min。

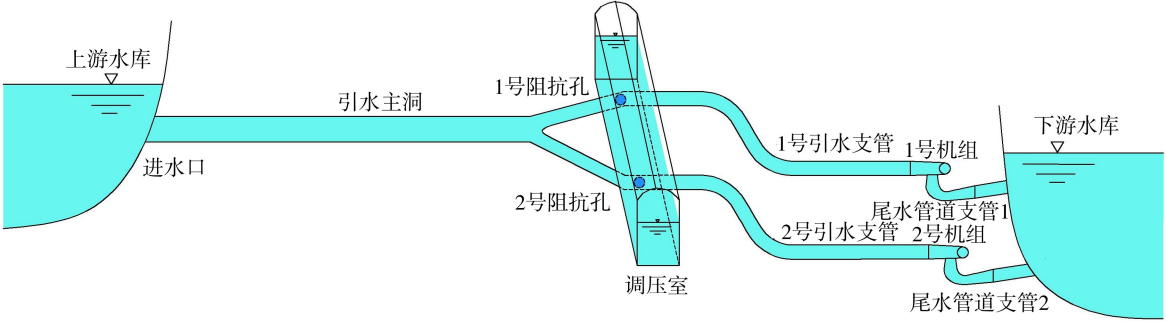


图3 水电站输水发电系统布置示意图

2.2 计算工况

基于图3所示输水发电系统,考虑两类调压室建模方法,构建相应的输水发电系统水力过渡过程计算分析模型,并选取5组典型工况(表1)开展分析比较,重点关注各工况调压室涌波特性及局部流态。5组工况的水位组合均为:水库水位1378 m,尾水位1306.43 m。机组导叶采用先快后慢的折线关闭规律,总关闭时间为19 s,折点时间为4 s,折点导叶相对开度为0.5。

表1 计算工况	
工况编号	工况说明
T1	1号机组由空载增至满荷,2号机组停机
T2	1号机组甩荷,2号机组停机
T3	两机组满负荷运行,1号机组甩荷,2号机组正常运行
T4	1号机组由空载增至满荷,2号机组正常运行
T5	1号机组增荷,2号机组正常运行,当调压室流量最大时,两机组均甩荷

注:T2、T4工况的初始状态为双机不对称运行。

2.3 调压室涌波特性

结合表1所示计算工况,研究不同水力边界模型对调压室涌波特性的影响,各工况调压室涌波水位时程对比见图4,图中 Z 为调压室涌波水位。调压室涌波水位极值见表2,表中 Z_0 为调压室初始时刻水位, $Z_{\max}$ 为调压室最高涌波水位, $Z_{\min}$ 为调压室最低涌波水位, $\Delta Z_{\max}$ 、 $\Delta Z_{\min}$ 分别为两模型调压室最高涌波水位差值和最低涌波水位差值。

图4和表2表明:调压室水力边界采用两种不同的建模方案会在一定程度上影响调压室涌波过程,相较于简化模型,精细模型对应的调压室最高涌

表2 调压室涌波水位极值

单位:m

工况	模型	Z_0	$Z_{\max}$	$Z_{\min}$	$\Delta Z_{\max}$	$\Delta Z_{\min}$
T1	简化模型	1377.98	1379.17	1372.94	-0.52	-0.18
	精细模型	1377.96	1378.65	1372.76		
T2	简化模型	1377.38	1382.66	1374.97	-0.08	0.04
	精细模型	1377.07	1382.58	1375.01		
T3	简化模型	1375.70	1381.09	1375.35	-0.45	-0.15
	精细模型	1375.19	1380.64	1375.19		
T4	简化模型	1377.43	1376.99	1371.54	-0.64	-0.39
	精细模型	1377.06	1376.35	1371.15		

波水位偏低,但偏差均小于1.0 m,最低涌波水位的偏差也很小;而当系统过渡到不对称运行时,精细模型能更准确地反映调压室涌波的衰减特性,相应的水位波动幅度略小且较快衰减并趋于稳定。分析可知,精细模型对应的调压室在两引水支管上各有一个阻抗孔,而机组不对称运行使得两阻抗孔水流进/出调压室不同步,甚至方向相反,受调压室阻力特性的影响,调压室内水位波动整体上趋于稳定,在一维数值计算中表现为调压室水位变化动态特性较优。因此,基于简化模型和精细模型得到的调压室涌波水位极值基本一致,同时精细模型能更加准确地反映不同工况下调压室涌波的动态过程。

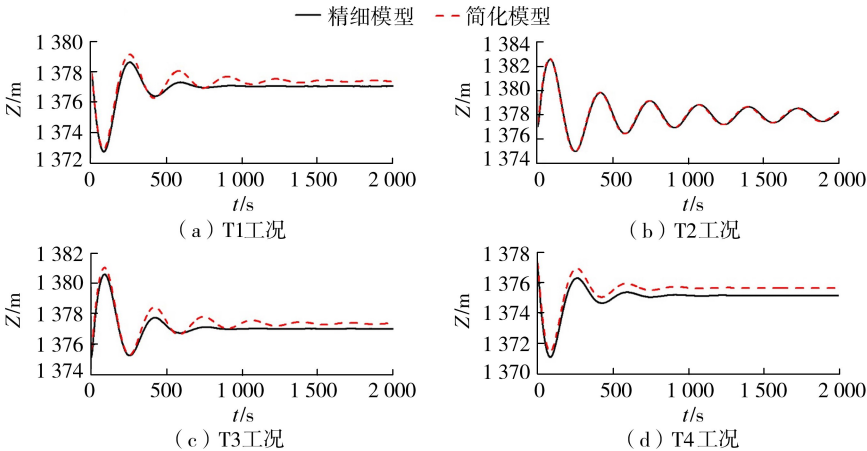


图4 各工况调压室水位时程对比

2.4 调压室进/出流量及瞬时流态

基于室前分岔调压室的涌波特性分析,利用精细模型研究机组不对称运行条件下,水流进/出两阻抗孔的流量以及调压室底部流量的变化。T1~T4 工况下水流进/出两阻抗孔的流量变化过程如图 5 所示,图中 Q 为水流进/出阻抗孔的流量,以流进调压室为正,流出为负。

由图 5 可知,采用室前分岔布置形式的调压室,其底部各阻抗孔和各支管相连,在不对称运行条件下两阻抗孔内会出现进/出流量大小不一致甚至水流方向相反的现象,T1 工况和 T3 工况对应着两机组从对称运行状态过渡到不对称运行状态,此时进/出两阻抗孔的流量变化过程不一致的现象比较明显,但 T2 工况和 T4 工况对应着两机组从不对称运行状态过渡到对称运行状态,此时进/出两阻抗孔的流量变化过程不一致的现象不明显,进/出两阻抗孔流量变化过程趋于一致。该现象说明两机组在不对称运行条件下该长廊形引水调压室内水流存在纵向流动。

根据各工况水流进/出两阻抗孔的流量变化过程,可以得到 T1、T2、T3、T4 工况两阻抗孔流量偏差

最大的时刻,分别记为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ,得到各工况该时刻重要节点(包括分岔点前、1 号支管分岔点后、1 号阻抗孔处、1 号阻抗孔底部下游支管、2 号支管分岔点后、2 号阻抗孔处、2 号阻抗孔底部下游支管、调压室内)的流量大小与方向,如图 6 所示。

在机组不对称运行条件下,水流进/出该长廊形引水调压室两阻抗孔的流量大小不一致甚至方向相反,调压室内水体并不处于静止流态,而是会产生纵向流动,甚至水流从一个阻抗孔流进调压室,再由另一个阻抗孔流出,调压室内流态较为复杂,在调压室水位升降过程中会伴随水面的小幅振荡,调压室内复杂的流态和水位波动特性可能会影响调压室涌波的极值,甚至影响系统运行的可靠性和稳定性。因此,对于具有多阻抗孔的长廊形引水调压室,应分析不对称运行条件下调压室内的纵向流动现象。

2.5 调节保证计算参数的影响

基于设置长廊形引水调压室的输水发电系统,研究不同水力边界模型对机组调节保证计算参数的影响。选取 T3、T5 工况的 1 号机组进行分析,图 7 为 T3 工况两模型 1 号机组调节保证计算参数的动态曲线,图 8 为 T5 工况两模型 1 号机组调节保证计

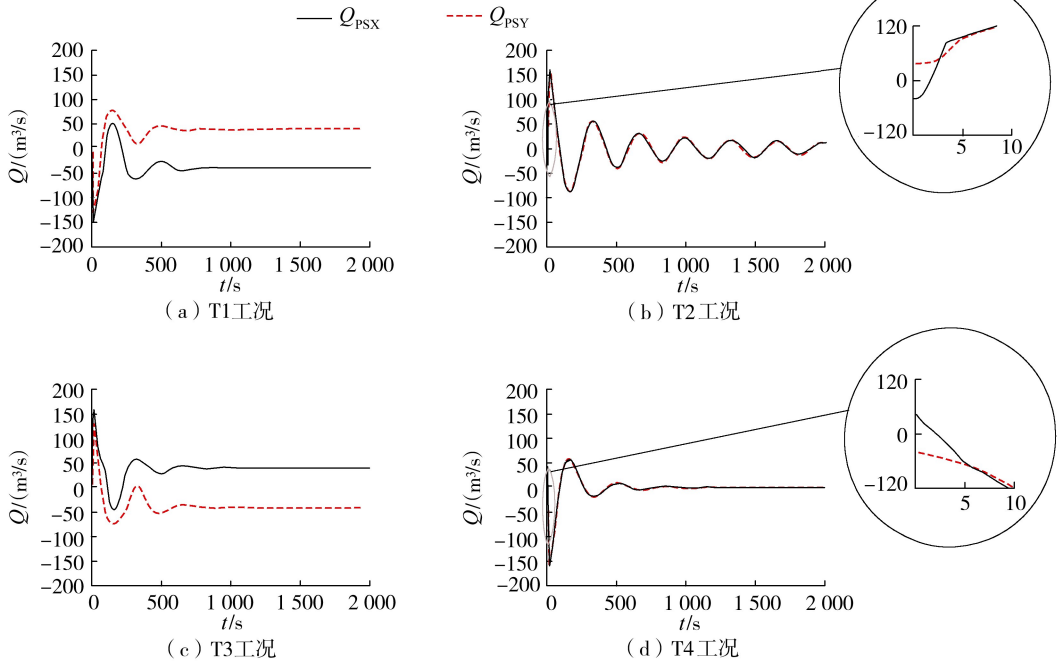


图 5 各工况水流进/出两阻抗孔的流量变化过程

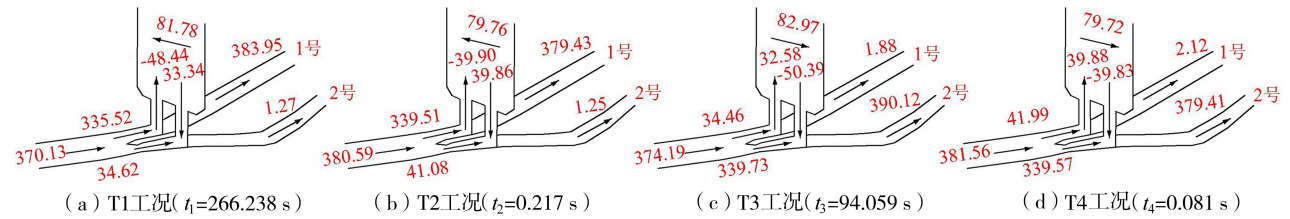


图 6 各工况不同时刻节点流量(单位: m^3/s)

算参数的动态曲线。两模型 1 号机组调节保证计算参数控制值如表 3 所示。

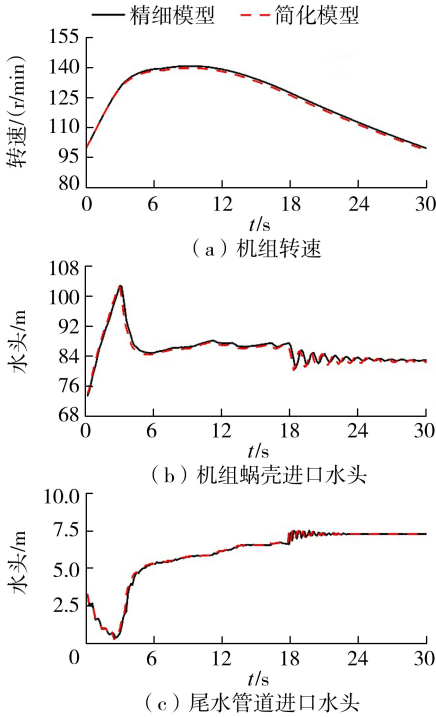


图 7 T3 工况两模型 1 号机组调节保证计算参数

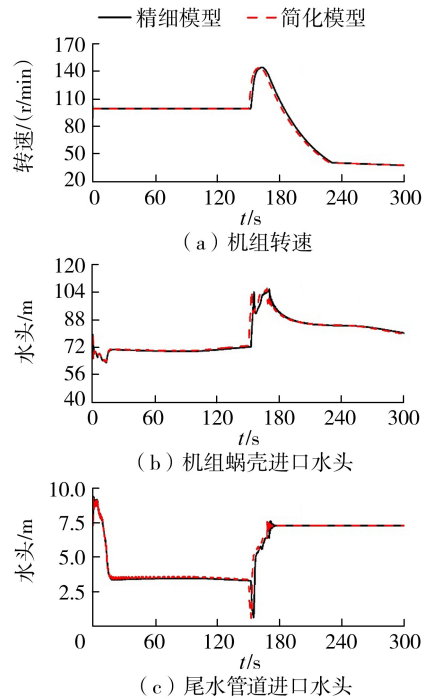


图 8 T5 工况两模型 1 号机组调节保证计算参数

图 7、图 8 和表 3 表明：T3 和 T5 工况两模型的机组最大转速差值在 1.1 r/min 以内，机组蜗壳最大进口水头差值在 0.50 m 以内，尾水管道最小进口水头差值在 0.10 m 以内，各控制值的偏差均较小，即采取不同水力边界模型对机组调节保证计算参数的动态过程及其控制值影响较小。

表 3 1 号机组调节保证计算参数控制值

工况	模型	机组最大 转速/(r/min)	机组蜗壳最大 进口水头/m	尾水管道最小 进口水头/m
T3	简化模型	139.94	102.53	0.28
	精细模型	140.95	102.80	0.37
T5	简化模型	144.79	106.17	0.58
	精细模型	145.00	105.77	0.61

3 结 论

- a. 考虑底部并列支管和多阻抗孔的调压室精细模型能准确描述长廊形引水调压室的水力特性，相较于调压室简化模型，得出的涌波极值偏差较小，且能准确反映不对称运行条件下调压室涌波的快速衰减特性。
- b. 在机组不对称运行条件下，双机共用的长廊形引水调压室底部两个阻抗孔的进/出水不同步，调压室内部水流存在明显的纵向流动，一定条件下会影响系统的水力振荡特性及其稳定性。
- c. 利用准确描述调压室局部水力特性的精细模型，能够得到机组调节保证计算参数的动态过程及其控制值。采取不同水力边界模型对机组调节保证计算参数的影响较小。

参考文献：

[1] 梁春光,程永光. 基于 CFD 的抽水蓄能电站岔管水力优化[J]. 水力发电学报,2010,29(3):84-91. (LIANG Chunguang,CHENG Yongguang. Hydraulic optimization of pipe bifurcation of pumped-storage power station by CFD method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(3):84-91. (in Chinese))

[2] 彭玮,张小康,杨建东,等. 官地水电站尾水系统体型优化研究[J]. 水电与新能源,2011(2):41-46. (PENG Wei,ZHANG Xiaokang,YANG Jiandong, et al. Shape optimization on tailwater system of Guandi Hydropower Station[J]. Hydropower and New Energy,2011(2):41-46. (in Chinese))

[3] 徐天茂,张立翔,曾云,等. 具有复杂引水系统的水轮机控制模型简化方法[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2012,37(2):88-94. (XU Tianmao,ZHANG Lixiang,ZENG Yun, et al. Simplified method of control method of hydro turbine with complex conduit system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science),2012,37(2):88-94. (in Chinese))

[4] 储善鹏,张健,俞晓东. T 形三通管计算模型对尾水进口压力和调压室涌浪的影响[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(1):42-49. (CHU Shanpeng,ZHANG Jian,YU Xiaodong. Influence of tee minor hydraulic loss model on draft tube inlet pressure and upsurge in surge chamber [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2018,36(1):42-49. (in Chinese))

- [5] 陈龙,俞晓东,林文雯,等. 抽蓄机组流量不同步变化对尾水管低压的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(9):899-905. (CHEN Long, YU Xiaodong, LIN Wenwen, et al. Influence of unsynchronous flow change of pumped storage unit on low-pressure of draft tube[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(9):899-905. (in Chinese))
- [6] 杨建东,郑向阳,李进平,等. 多机一洞水电站水力-调速系统的稳定分析[J]. 水电能源科学,2005,23(3):12-14. (YANG Jiandong, ZHENG Xiangyang, LI Jinping, et al. Stability analysis of hydraulic and governor system at multi-unit sharing one tailrace tunnel hydropower plant [J]. Water Resources and Power, 2005, 23(3):12-14. (in Chinese))
- [7] 张辉,胡钊. 多机共尾水调压室流道结构水轮机调节振荡研究[J]. 水利学报,2015,46(2):229-238. (ZHANG Hui, HU Po. Study on regulating oscillation in multi hydro turbine generators sharing flow channel structure of tailrace surge tank[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(2):229-238. (in Chinese))
- [8] 陈益民,程文超,周建旭,等. 白鹤滩水电站输水发电系统水力干扰稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):78-84. (CHEN Yimin, CHENG Wenchao, ZHOU Jianxu, et al. Stability analysis on hydraulic disturb in water conveyance and hydropower system of Baihetan Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(5):78-84. (in Chinese))
- [9] 曹林宁,熊豆,吴道科. 具有多节点调压室的低水头输水发电系统水力干扰[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(11):1127-1132. (CAO Linning, XIONG Dou, WU Daoke. Hydraulic interference in low head water conveyance and power generation systems with multi-node surge chamber [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11):1127-1132. (in Chinese))
- [10] 周建旭,刘峰宏. 复杂输水发电系统尾水隧洞明满流对水力过渡过程的影响[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):51-56. (ZHOU Jianxu, LIU Fenghong. Impact of free-surface-pressure flow in tailwater tunnel on hydraulic transition process in complex water conveyance and hydropower systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(3):51-56. (in Chinese))
- [11] 朱峰,蔡付林,花玉龙,等. 双机共用尾水调压室水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):95-98. (ZHU Feng, CAI Fulin, HUA Yulong, et al. Numerical simulation on hydraulic performance of tailrace surge tanks shared by two units[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014,12(3):95-98. (in Chinese))
- [12] 于桂亮. 双机共用尾水调压室内水体流态数值模拟分析[J]. 人民黄河,2015,37(8):105-107. (YU Guiliang. Numerical simulation on hydraulic performance of tailrace surge tank shared by two units[J]. Yellow River, 2015, 37(8):105-107. (in Chinese))
- [13] 廖翔,余波,张术彬,等. 双机共用尾水调压室阻力系数试验研究[J]. 人民长江,2017,48(1):80-83. (LIAO Xiang, YU Bo, ZHANG Shubin, et al. Experimental study on damping coefficient of tailrace surge tank shared by two units [J]. Yangtze River, 2017, 48(1):80-83. (in Chinese))
- [14] 蔡付林,刘启钊,索丽生,等. 两机共用的尾水调压室水力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),1996,24(6):66-71. (CAI Fulin, LIU Qizhao, SUO Lisheng. Experimental study on hydraulic characteristics of rectangular tailrace surge tank shared by two units [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1996, 24(6):66-71. (in Chinese))
- [15] 胡明,蔡付林,周建旭. 溪洛渡水电站尾水系统水力动态特性试验研究[J]. 水利水电技术,2002,33(3):11-13. (HU Ming, CAI Fuling, ZHOU Jianxu. Experimental study on hydrodynamic characteristics of tail system of Xiluodu Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(3):11-13. (in Chinese))
- [16] 程永光,刘晓峰,杨建东. 大型尾水调压室底部交汇型式CFD分析与优化[J]. 水力发电学报,2007,26(5):68-74. (CHENG Yongguang, LIU Xiaofeng, YANG Jiandong. Optimization of the converging type of conduit of tailrace surge tank by CFD method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5):68-74. (in Chinese))
- [17] 华富刚,秦柳燕. 水电站调压室内三维湍流场数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2007,27(5):47-49. (HUA Fugang, QIN Liuyan. Numerical simulation of 3D turbulent flow in surge tanks of hydropower stations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(5):47-49. (in Chinese))
- [18] 俞晓东,张健,陈胜. 尾水采用室后交汇布置的水电站过渡过程研究[J]. 水力发电学报,2014,33(6):142-148. (YU Xiaodong, ZHANG Jian, CHEN Sheng. Hydraulic transients in hydropower station with bifurcated pipes converging behind tailrace surge tank [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6):142-148. (in Chinese))
- [19] 黄静之,周建旭,刘跃飞,等. 底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):176-181. (HUANG Jingzhi, ZHOU Jianxu, LIU Yuefei, et al. 3D numerical analysis of hydraulic characteristics for surge chamber with partition-type bifurcated pipe in bottom [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2):176-181. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-31 编辑:骆超)