

# 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

周建旭, 刘峰宏

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究输水发电系统中明满流尾水系统的水力特性及其适用性, 基于特征线法和特征隐式格式法建立水电站输水发电系统过渡过程分析模型, 比较分析了明满流与全有压流两类尾水系统的水力特性以及尾水系统明满流过渡过程对输水发电系统瞬态参数和机组调节品质的影响。结果表明: 在尾水隧洞全有压和明满流条件下, 机组调节保证计算参数的控制值偏差较小, 明满流尾水系统对应的尾水管进口最小内水压力相对较大; 考虑明满流尾水系统的机组调节品质优于有压流尾水系统, 且无明显的高频振荡叠加现象。

**关键词:** 全有压流; 明满流; 水力过渡过程; 特征线法; 特征隐式格式

中图分类号: TV134.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)03-0051-06

**Impact of free-surface-pressure flow in tailwater tunnel on hydraulic transition process in complex water conveyance and hydropower systems**//ZHOU Jianxu, LIU Fenghong (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To study the hydraulic characteristics and applicability of the free-surface-pressure flow tailwater system in the water conveyance and hydropower system, an analysis model for the transition process of the water conveyance and hydropower system was established based on the method of characteristics and the characteristic implicit format. The hydraulic characteristics of two types of tailwater systems, namely, the free-surface-pressure flow and the full-pressure flow, were compared and analyzed. Furthermore, the influence of the transition process of the free-surface-pressure flow tailwater system on the transient parameters of the water conveyance and hydropower system and the regulating quality of the units was further investigated. The results show that, under the conditions of full-pressure flow and free-surface-pressure flow in the tailwater tunnel, the regulating quality of the units ensures that the controlled value deviation of the calculated parameters is small, and the minimum internal water pressure at the inlet of the tailwater pipe corresponding to the free-surface-pressure flow tailwater system is relatively large. The regulating quality of the units of the free-surface-pressure flow tailwater system is better than that of the full-pressure flow tailwater system, and there is no obvious high-frequency oscillation superposition phenomenon.

**Key words:** full-pressure flow; free-surface-pressure flow; hydraulic transition process; method of characteristics; characteristic implicit format

水电站水力过渡过程和机组运行的调节品质是决定输水发电系统布置形式、工程规模和运行特性的重要因素。在引水式水电站中, 有压尾水隧洞是水电站尾水系统常用的布置形式, 考虑到地质地形条件、尾水位运行范围和尾水隧洞长度等因素, 明满流尾水隧洞逐渐成为一类重要的比选形式。水电站尾水系统不同的布置形式会对机组运行产生不同程度的影响。对于尾水隧洞明满流的水力特性及其对机组调节品质的影响, 诸多学者开展了较为全面的

研究。在明满流尾水隧洞的运行安全方面, Cheng等<sup>[1]</sup>采用流体体积模型研究了变顶高尾水洞的明满流水力特性, 分析表明变顶高尾水洞明满流过渡过程中不会产生破坏隧洞结构的压力; 桂竹君等<sup>[2]</sup>的研究表明, 明满流现象所产生的负压及空腔不可避免地影响隧洞局部, 对水电站的安全运行无明显不利的影响。在尾水隧洞明满流对机组调节品质的影响方面, 周建旭等<sup>[3]</sup>、李修树等<sup>[4]</sup>分别建立了考虑尾水隧洞明满流特性的数学模型, 分析了设置明

满流尾水隧洞水电站的运行稳定性和机组的调节品质;陈益民等<sup>[5]</sup>的研究表明白鹤滩水电站尾水系统明满流特性有利于改善水力干扰过渡过程对机组运行稳定性的影响;陈刚等<sup>[6]</sup>基于模型试验和数值模拟,分析了尾水洞出现明满流的水电站的小波动稳定性;孙洪亮等<sup>[7]</sup>阐明了白鹤滩尾水隧洞明满流过渡过程对水电站运行的有利影响。

国内外相关研究在有压流尾水隧洞水力特性的基础上,较全面地分析了明满流尾水隧洞的水力特性,分析表明,机组调节运行过程中,尾水隧洞会产生明满流过程,甚至出现复杂的明满流交替现象,此时洞内的水流紊乱、压力变化较为剧烈,继而产生的水力振荡过程不可避免地影响机组的运行和调节品质<sup>[8]</sup>,同时对尾水隧洞结构产生影响<sup>[9]</sup>。对于多机共明满流尾水布置的输水发电系统,考虑到机组之间的水力联系和尾水系统明满流过渡过程,在调节控制过程中,相关水力因素的叠加使得输水发电系统的过渡过程特性和机组运行调节更为复杂。

为了进一步阐明明满流过渡过程对复杂输水发电系统水力特性和系统调节品质的影响,本文基于有压输水系统特征线法和明满流过渡过程分析的特征隐式格式法,建立了含明满流的输水发电系统过渡过程分析模型,并结合算例进行了系统大波动过渡过程和机组运行调节品质分析,以期为提高系统的可靠性和安全性提供重要依据。

# 1 输水发电系统过渡过程分析模型

## 1.1 含明满流输水发电系统

基于有压输水系统特征线法和明满流过渡过程分析的特征隐式格式法,建立由引水隧洞、上游调压室、水轮机组、闸门井和尾水隧洞等输水建筑物组成的输水发电系统过渡过程分析模型。在进行系统模型分析时,考虑全有压流尾水系统和含明满流尾水系统两类数学模型。

图1(a)所示的输水发电系统,每台机组的尾水支洞设置闸门井,3台机组尾水支洞并联闸门井与引水调压室串联,尾水合岔点下游侧衔接较大反坡

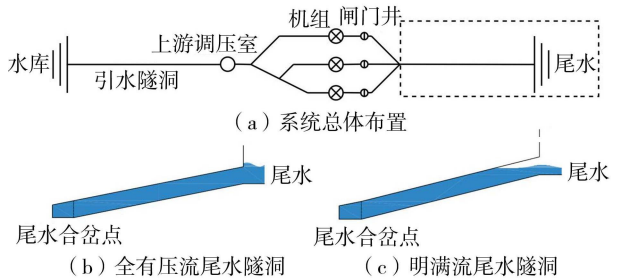


图1 输水发电系统布置简图

的尾水主洞,考虑合岔点不同的布置高程和尾水主洞不同的反坡坡度,分别对应两类不同的布置形式,即全有压流尾水隧洞(图1(b))和明满流尾水隧洞(图1(c))。

## 1.2 有压输水系统特征线法

特征线法是求解有压输水系统水力过渡过程常用的数值计算方法,具有实用性、稳定性强的优点。基于此,采用特征线法建立输水发电系统有压部分过渡过程的分析模型。在有压流问题的数值模拟分析中,特征线法的相容方程<sup>[10]</sup>为

$$C^+ : H_P = C_{k-1} - S_{k-1} Q_P \tag{1}$$

$$C^- : H_P = C_{k+1} + S_{k+1} Q_P \tag{2}$$

其中

$$C_{k+1} = H_{k+1} - \frac{a}{gA} Q_{k+1}$$

$$S_{k+1} = \frac{a}{gA} + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} |Q_{k+1}|$$

$$C_{k-1} = H_{k-1} + \frac{a}{gA} Q_{k-1} \quad S_{k-1} = \frac{a}{gA} + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} |Q_{k-1}|$$

式中: $H$ 、 $Q$ 分别为管道断面的测压管水头和流量;下标 $P$ 对应的参数为未知的瞬时参数;下标 $k-1$ 、 $k$ 、 $k+1$ 为管道相邻的3个断面编号; $a$ 为水锤波速; $A$ 为过水断面面积; $f$ 为摩阻系数; $D$ 为管道直径; $g$ 为重力加速度; $\Delta x$ 为水锤每计算时长所移动的距离。

基于有压输水系统特征方程(式(1)和(2)),分别考虑水库、调压室、机组和合岔点等边界条件,则可建立考虑全有压流尾水隧洞的输水发电系统过渡过程计算分析模型。

## 1.3 尾水隧洞明满流特征隐式格式法

对于明满流尾水隧洞,当尾水隧洞出口水位位于特定范围内时,隧洞内可能会出现明满流过渡过程,其水力特性取决于隧洞的顶部高度、顶坡和底坡等因素,明满流交界面动态变化并趋于稳定,在过渡段伴随着流态的转变,相关水力特性的模拟较为复杂,给问题的求解带来了困难。通常,用于计算明满流过渡过程的方法包括激波拟合法、刚性水柱法和狭缝法<sup>[10]</sup>,其中狭缝法<sup>[11-12]</sup>最常用。陈杨等<sup>[13]</sup>基于Preissmann格式辅以删减对流加速度项法和狭缝法,提出了能够有效解决缓流、急流、跨临界流和明满流的数值模拟方法。对于狭缝法,通常的Preissmann隐式格式计算稳定性较差,收敛性也难以保证。鉴于此,本文采用收敛性较好的特征隐式格式法<sup>[10,14]</sup>以准确地模拟和揭示尾水隧洞明满流的动态特性。

对于尾水隧洞的明满流过渡过程,基于狭缝假设<sup>[14]</sup>,明渠流动的连续方程和动量方程分别为

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} = gA(i - J_f) \quad (4)$$

式中:  $B$  为水面宽;  $h$  为断面水深;  $Q$  为断面流量;  $i$  为隧洞底坡;  $x$  为沿隧洞的水平距离;  $t$  为时间;  $J_f$  为沿程水头坡度。

将连续方程(式(3))乘以因子  $l^\pm = -(Q/A) \pm \sqrt{gA/B}$  后加到动量方程(式(4))上, 进一步在  $(m, n)$  进行差分, 对  $\partial/\partial t$  项采用向前差分, 对  $\partial/\partial x$  项采用不同的差分格式, 而重力项、摩擦项、 $\partial A/\partial x$  项按  $n+1$  时层, 其他项按  $n$  时层计算, 可得描述尾水隧洞明满流流动的特征方程:

$$a_1 h_{m-1}^{n+1} + b_1 Q_{m-1}^{n+1} + c_1 h_m^{n+1} + d_1 Q_m^{n+1} = e_1 \quad (5)$$

$$a_2 h_m^{n+1} + b_2 Q_m^{n+1} + c_2 h_{m+1}^{n+1} + d_2 Q_{m+1}^{n+1} = e_2 \quad (6)$$

式中: 下标  $m-1, m, m+1$  为相邻的 3 个计算断面编号; 上标  $n+1$  表示计算时层; 系数  $a, b, c, d$  和右端项  $e$  为已知数, 取决于前一时刻计算断面和上下游相邻两断面的水深和流量。

式(5)和(6)采用牛顿-拉弗森法线性化, 可得到明满流尾水隧洞各计算断面水深和流量的瞬时解。

对于明满流尾水隧洞的边界条件, 在明满流尾水洞的起点, 即在过渡过程中始终保持有压的尾水合岔点, 上游与 3 个尾水支洞的末端衔接。令明满流尾水洞起始点节点号为 1, 结合有压管道的特征线方程, 可得该边界条件的数学模型。

令任一尾水支洞末端节点为  $k_i (i=1, 2, 3)$ , 其正向方程为

$$C^+: H_{k_i} = C_{k_i-1} - S_{k_i-1} Q_{k_i} \quad (7)$$

又依据流量连续条件和水头平衡条件有

$\sum_{i=1}^3 Q_{k_i-1} = Q_1, H_{k_i-1} = h_1 + Z_d (i=1, 2, 3)$ , 其中  $Z_d$  为洞底高程, 代入式(7)可得:

$$F_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{S_{k_i-1}} h_1 + Q_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{S_{k_i-1}} Z_d - \sum_{i=1}^3 \frac{C_{k_i-1}}{S_{k_i-1}} = 0 \quad (8)$$

式(8)经过牛顿-拉弗森法线性化, 即为明满流尾水洞整体带状矩阵的第一行元素及相应的右端项:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{S_{k_i-1}} & 1 & 0 & 0 \\ a_{2,1} & b_{2,1} & c_{2,1} & d_{2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ e_{2,1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

明满流尾水隧洞出口为下游尾水, 在特定工况下, 尾水位近似保持不变。令明满流尾水隧洞出口

的节点编号为  $u$ , 可得该边界条件的数学模型。由于尾水隧洞中出现明满流时, 尾水隧洞出口保持为明流, 可考虑尾水隧洞出口水位是随着出口流量变化的, 令下游尾水位为  $Z_w$ , 出口洞底高程为  $Z_u$ , 则有

$$F_u = h_u + Z_u - Z_w - \xi \frac{Q_u |Q_u|}{2gA_u^2} = 0 \quad (10)$$

式中:  $\xi$  为尾水隧洞出口的局部损失系数;  $A_u$  为出口断面过水面积。

式(9)经过牛顿-拉弗森法线性化, 引进相应参数的增量表示形式, 得明满流尾水隧洞的整体带状矩阵的第  $2u$  行元素及相应的右端项, 即

$$\begin{bmatrix} a_{1,u} & b_{1,u} & c_{1,u} & d_{1,u} \\ 0 & 0 & 1 & -\xi \frac{|Q_u|}{gA_u^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_{u-1} \\ \Delta Q_{u-1} \\ \Delta h_u \\ \Delta Q_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1,u} \\ -F_u \end{bmatrix} \quad (11)$$

#### 1.4 含明满流尾水隧洞的系统过渡过程分析模型

基于有压输水系统特征线法, 考虑水库、引水调压室、合岔点、水轮机组和尾水支洞闸门井等水力边界条件, 形成输水发电系统水库-明满流尾水隧洞进口段过渡过程计算分析模块, 引入始终有压的明满流尾水隧洞进口的水力耦合条件, 融合适用于明满流过渡过程分析的特征隐式格式法的明满流尾水隧洞过渡过程计算分析模块, 构建含明满流尾水隧洞的输水发电系统过渡过程计算分析的数值仿真模型, 开展相应的系统过渡过程特性和机组运行调节品质分析。

#### 2 明满流过渡过程特性和机组调节品质

如图 1 所示, 水电站引水和尾水系统均采用“一洞三机”的布置形式, 水轮机额定转速为 428.57 r/min, 额定水头为 327.00 m, 额定流量为 76 m<sup>3</sup>/s, 最大出力为 74.5 MW, 机组安装高程为 906.00 m, 转动惯量为 187.5 t·m<sup>2</sup>。设置引水调压室, 尾水系统由尾水支洞、尾水支洞闸门井、尾水合岔点、尾水主洞和尾水出口等组成, 尾水支洞闸门井类似于调压室边界条件。其中, 明满流尾水主洞为直径 6.5 m 的圆形断面, 包括长为 185.0 m、坡度为 4.885% 的反坡段和长为 30.0 m 的出口平坡段, 隧洞出口顶高程为 916.5 m, 高于最低运行尾水位, 若为有压流尾水隧洞, 进口断面高程降低 1.0 m, 同时反坡坡度减小为 2.810%, 尾水出口平坡段高程降低, 低于最低运行尾水位。

水电站尾水隧洞明满流特性不仅与尾水隧洞的断面尺寸和布置坡度密切相关, 而且取决于电站的



运行工况,即运行流量及其变化特性,隧洞明满流分析的特征隐式格式能够准确模拟尾水隧洞的形式、布置与尺寸,基于此,着重结合反映尾水隧洞明满流特性的控制工况开展计算分析。

2.1 尾水隧洞明满流过渡过程特性及其影响

通过对含明满流尾水隧洞的水电站输水发电系统进行大波动过渡过程特性分析,阐明尾水隧洞明满流的动态过程及其影响。对于尾水隧洞明满流过渡过程而言,尾水位通常会呈现不同程度的动态波动并趋于稳定,考虑到该输水发电系统尾水出口河道水面宽阔,不考虑尾水位的动态变化,据此拟定尾水隧洞出现明满流流态的控制工况,尾水位均为常水位 914.11 m,低于尾水隧洞出口顶高程,涵盖单一的甩负荷工况和先增负荷后甩负荷的组合工况。过渡过程具体分析工况见表 1。

表 1 过渡过程分析工况

| 工况 | 水库水位/m  | 尾水位/m  | 机组运行情况                                                      |
|----|---------|--------|-------------------------------------------------------------|
| T1 | 1255.00 | 914.11 | 3 台机组额定水头运行,同时甩负荷,导叶紧急关闭                                    |
| T2 | 1255.00 | 914.11 | 2 台机组相应水头最大功率运行,1 台机组由空载增负荷,在上游调压室涌波水位最低时,3 台机组同时甩负荷,导叶紧急关闭 |
| T3 | 1255.00 | 914.11 | 3 台机组同时从空载增负荷至额定功率,在流出上游调压室流量最大时,3 台机组同时甩负荷,导叶紧急关闭          |

结合表 1 给出的典型计算分析工况,基于建立的含明满流尾水隧洞水电站输水发电系统过渡过程计算分析模型,研究系统的水力过渡过程特性和明满流动态过程,并结合全有压流尾水隧洞布置形式进行进一步的比较分析,以阐明明满流尾水隧洞的运行特点及其适用性,控制参数见表 2。由表 2 可知:输水发电系统采用明满流尾水隧洞或全有压流尾水隧洞,机组蜗壳进口内水压力、机组转速和尾水管进口内水压力的极值接近,即两类不同的尾水隧洞布置形式对应的系统特征参数控制值基本一致,其中机组蜗壳进口最大内水压力和机组最大转速的偏差很小,而受尾水隧洞水力特性直接影响的尾水管进口最小内水压力存在较为明显的偏差,表现为

表 2 大波动过渡过程计算控制参数

| 工况 | 布置形式     | 机组蜗壳进口最大内水压力/m | 机组蜗壳进口最小内水压力/m | 机组转速/(r/min) | 尾水管进口最大内水压力/m | 尾水管进口最小内水压力/m |
|----|----------|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------|
| T1 | 明满流尾水隧洞  | 388.46         | 329.00         | 612.19       | 13.52         | 0.21          |
|    | 全有压流尾水隧洞 | 388.60         | 328.85         | 612.48       | 14.41         | -0.99         |
| T2 | 明满流尾水隧洞  | 389.00         | 323.66         | 603.83       | 13.10         | 0.76          |
|    | 全有压流尾水隧洞 | 389.10         | 323.64         | 603.72       | 13.92         | 0.12          |
| T3 | 明满流尾水隧洞  | 401.30         | 300.16         | 611.35       | 13.47         | 0.42          |
|    | 全有压流尾水隧洞 | 398.26         | 299.98         | 611.34       | 14.37         | -0.03         |

注:压力以压力水头表示。

设置明满流尾水隧洞一定程度上可有效改善尾水管进口最小内水压力。

基于各计算工况过渡过程分析成果,得到明满流尾水隧洞沿线高程及测压管水头线如图 2 所示,各工况明满流分界点动态过程线如图 3 所示,以及尾水隧洞出口流量过程线如图 4 所示。

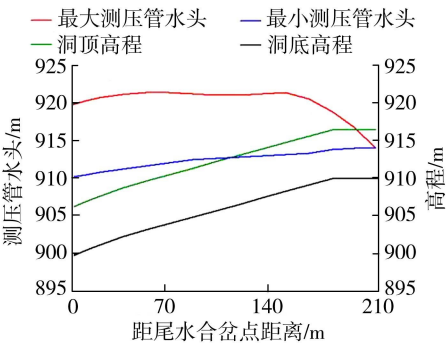


图 2 明满流尾水隧洞沿线高程及测压管水头线

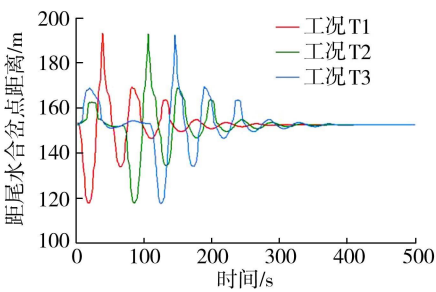


图 3 明满流分界点动态过程线

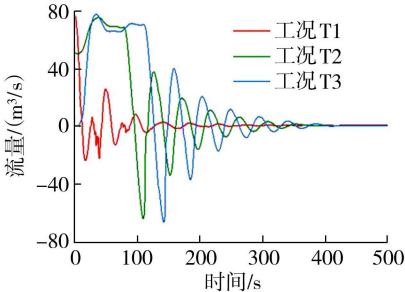


图 4 明满流尾水隧洞出口流量过程线

由图 2~4 分析可知:

a. 针对明满流尾水隧洞布置形式,如图 2 所示,在距尾水舍岔点约 117 m 的位置开始会出现明满流且水面波动平缓,衔接边界,即明满流分界点是唯一的,上游侧始终为有压流流态,下游侧为典型的

明流流态;尾水隧洞沿线明满流段流态平稳,未出现明满流交替的复杂流态;尾水隧洞出口平坡段最大测压管水头线变化较为明显,主要是受平坡段明满流分界点移动相对较为迅速及产生的压力振荡的影响。

b. 在甩负荷工况 T1 下,随着运行流量的减小,明满流分界点向上游侧移动,与尾水合岔点的距离减小,其最小距离为 117 m,即明满流尾水隧洞上游侧 117 m 始终为有压流流态,明满流过渡段的最大长度为 90 m,然后往复移动并逐渐趋于稳定;在先增后甩的组合工况 T2 和 T3 下,在增负荷阶段,随着运行流量的增大,明满流分界点向下游侧移动,与尾水合岔点的距离增大,3 台机组增荷工况 T3 对应的行程较大,在某一时刻 3 台机组同时甩荷后,明满流分界点的动态过程类似于工况 T1,出现明显的往复移动亦逐步趋于稳定。结合图 4 的尾水出口流量过程线分析可知,尾水出口流量的动态变化过程与尾水隧洞明满流分界点的移动趋势是对应一致的。

c. 各计算工况在明满流过渡过程中,尾水隧洞沿线均存在单一的、动态移动的明满流分界点,其上游侧始终为有压流流态,下游侧为无压流流态,可知尾水隧洞中不会出现复杂的明满交替流现象。

## 2.2 水力干扰过渡过程特性分析

多台机组之间存在水力联系的输水发电系统,不可避免会出现机组之间的水力干扰问题,甩荷或增荷机组会直接影响运行机组的调节品质。基于下述整定的调速器参数,结合控制工况分别考虑全有压流尾水隧洞和明满流尾水隧洞两类布置形式,分

析发生水力干扰时运行机组的调节品质,其中调速器缓冲时间常数  $T_d=6.0\text{ s}$ ,暂态转差系数  $b_1=0.5$ ,永态转差系数  $b_p=0.04$ ,电网负荷自调节系数  $S_f=1.5$ 。输水发电系统水力干扰过渡过程分析工况包括:①工况 D1,同一水力单元的 3 台机组额定功率运行,1 号机组甩满荷,对正常运行机组的影响;②工况 D2,同一水力单元的 3 台机组额定功率运行,1 号和 2 号机组同时甩满荷,对正常运行机组的影响。图 5 和图 6 为两个工况的水力干扰过渡过程曲线。

由图 5~6 可知:

a. 采用有压流尾水隧洞布置形式,同一水力单元 1 台或 2 台机组甩满荷时,运行机组转速受扰达到最大转速,在转速下降过程中伴随较为明显的振荡现象,持续时间较长,而后逐步趋于振荡稳定;D2 工况对应同一水力单元 2 台机组同时甩荷对受扰机组的影响,受扰机组转速的振荡过程更为明显;尾水支洞闸门井水位亦趋于振荡稳定,振荡周期与转速动态曲线中叠加的高频振荡周期基本一致。

b. 采用明满流尾水隧洞布置形式,1 台或 2 台机组甩满荷的扰动工况,受扰机组转速振荡稳定过程总体上类似于有压流尾水隧洞布置形式,但无明显的高频振荡叠加现象;对于有压流尾水隧洞,叠加的振荡过程与尾水隧洞的尾水支洞闸门井的振荡特性密切相关,同样也体现在尾水支洞闸门井水位的动态过程中,而对于明满流尾水隧洞,尾水隧洞有压段长度变化并趋于动态稳定,相应的压力振荡不明显。

c. 尾水隧洞两种不同的布置形式对应的转速

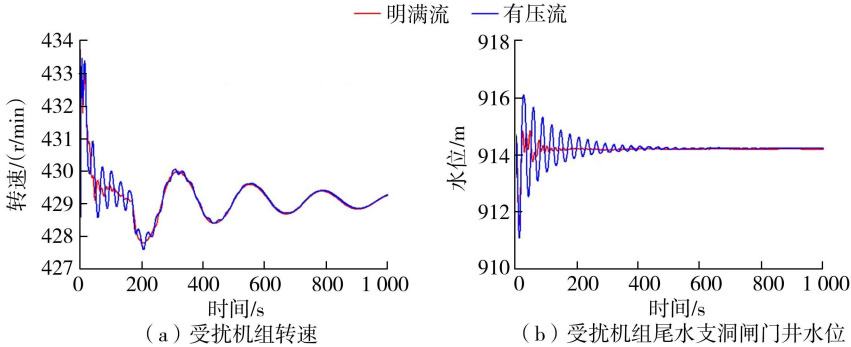


图 5 工况 D1 水力干扰过渡过程曲线

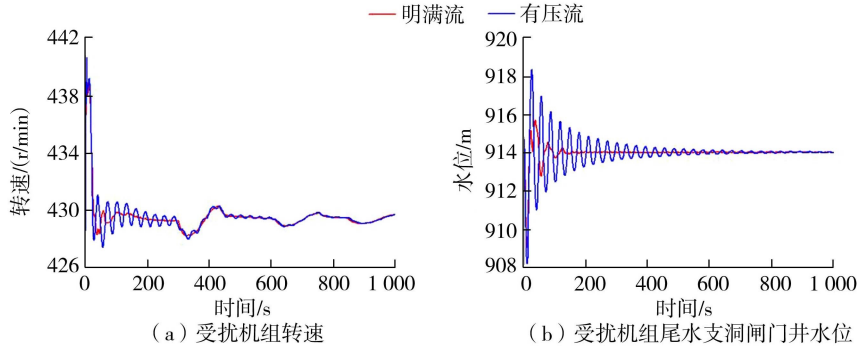


图 6 工况 D2 水力干扰过渡过程曲线

动态曲线后期受引水调压室水位波动尾波以及引水支管布置特性的影响,逐渐趋于稳定。

d. 从受扰机组的稳定性和调节品质分析,明满流尾水隧洞布置形式优于全有压流尾水隧洞,包括调节时间较短、衰减率较大,同时无明显的高频振荡叠加现象。

### 3 结 论

a. 采用合理布置的明满流尾水隧洞与采用有压流尾水隧洞所得到的输水发电系统调节保证计算参数控制值基本一致,且明满流尾水布置形式下尾水管进口最小内水压力表现较优。

b. 确定明满流尾水隧洞合理的顶坡,单一明满流分界点动态移动并迅速趋于稳定,不会出现复杂的明满交替流问题,且压力振荡较平缓。

c. 相较于有压流尾水隧洞,采用合理的明满流尾水隧洞,相应输水发电系统的水力干扰稳定性即机组调节品质相对较优。

### 参考文献:

[ 1 ] CHENG Yongguang, LI Jinping, YANG Jiandong. Free surface-pressurized flow in ceiling-sloping tailrace tunnel of hydropower plant;simulation by VOF model[J]. Journal of Hydraulic Research,2007,45(1):88-99.

[ 2 ] 桂竹君,彭芝英. 水电站尾水系统非恒定流试验研究[J]. 武汉水利电力学院学报,1989,22(4):104-112. ( GUI Zhujun,PENG Zhiying. Unsteady flow in the tailrace system of a hydropower station [ J ]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering,1989,22(4):104-112. (in Chinese))

[ 3 ] 周建旭,张健,刘德有. 双机共变顶高尾水洞系统小波动稳定性研究[J]. 水利水电技术,2004,35(12):64-67. (ZHOU Jianxu,ZHANG Jian,LIU Deyou. Study on small fluctuation in system of two units and common tail-tunnel with sloping ceiling[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2004,35(12):64-67. (in Chinese))

[ 4 ] 李修树,胡铁松,陈恺祥,等. 变顶高尾水系统小波动过渡过程中水流运动理论研究[J]. 长江科学院院报,2005,22(1):1-4. ( LI Xiushu, HU Tiesong, CHEN Kaixiang, et al. Theoretical research on water flow movement of transient process caused by small fluctuation with inclined roof tailrace structure[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2005,22(1):1-4. (in Chinese))

[ 5 ] 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))

[ 6 ] 陈刚,周建旭,胡明. 尾水洞出现明满流的水电站小波动稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):70-73. ( CHEN Gang, ZHOU Jianxu, HU Ming. Stability analysis of small fluctuation for hydropower stations with free-surface-pressurized flows in tail tunnels[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(3):70-73. (in Chinese))

[ 7 ] 孙洪亮,杨飞,李高会,等. 白鹤滩尾水隧洞明满流对水电站稳定性的影响[J]. 人民长江,2019,50(7):165-168. ( SUN Hongliang, YANG Fei, LI Gaohui, et al. Influence of free-pressure transition flow in tailrace tunnel on operation stability of Baihetan hydropower station[J]. Yangtze River,2019,50(7):165-168. (in Chinese))

[ 8 ] 李学宏. 基于尾水隧洞中明满流的危害及措施研究[J]. 黑龙江水利科技,2016,44(6):128-129. ( LI Xuehong. Study on the hazards and measures based on free-surface-pressurized flows in tailwater tunnels [ J ]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,2016,44(6):128-129. (in Chinese))

[ 9 ] 刘跃. 溪洛渡水电站尾水洞明满流交替研究[J]. 水电站设计,2018,34(1):69-72. ( LI Yue. Study on the alternation of free-surface-pressurized flows in the tailwater hole of Xiluodu hydropower station [ J ]. Design of Hydroelectric Power Station,2018,34(1):69-72. (in Chinese))

[ 10 ] 郑源,张健. 水力机组过渡过程[M]. 北京:北京大学出版社,2008.

[ 11 ] 于曼. 变顶高尾水洞不同顶坡大波动过渡过程分析[J]. 吉林水利,2019(5):20-24. ( YU Man. Analysis of transient process in varies ceiling slop of inclined roof tailrace[J]. Jilin Water Resources,2019(5):20-24. (in Chinese))

[ 12 ] 树锦,袁健. 基于 L-F 狭缝法的变顶高尾水洞过渡过程计算[J]. 人民长江,2014,45(1):73-76. ( SHU Jin, YUAN Jian. Transient flow calculation for roof-inclined tailwater tunnel based on L-F slot method [ J ]. Yangtze River,2014,45(1):73-76. (in Chinese))

[ 13 ] 陈杨,俞国青. 明满流过渡及跨临界流一维数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1):80-84. ( CHEN Yang, YU Guoqing. One-dimensional numerical simulation of transcritical flows and transition between free surface and pressurized flows [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(1):80-84. (in Chinese))

[ 14 ] 张宗溥,花玉龙,程欢. 导流洞改建尾水洞明满流过渡过程数值模拟[J]. 人民黄河,2015,37(4):105-108. ( ZHANG Zongpu, HUA Yulong, CHENG Huan. Numerical simulation of free surface-pressurized flow in tailrace tunnel transformed from diversion tunnel [ J ]. Yellow River,2015,37(4):105-108. (in Chinese))

(收稿日期:2023-08-16 编辑:俞云利)