

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221261

# 相继甩负荷间隔时间与尾水管进口压力最小值的内在联系研究

张永进<sup>1</sup>, 储善鹏<sup>2</sup>

(1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江省水利防汛技术中心, 浙江 杭州 310000)

**摘要:**为探求相继甩负荷间隔时间与尾水管进口压力最小值之间的内在联系,针对双机一洞布置型式的抽水蓄能电站,基于瞬变流理论和特征线法对相继甩负荷工况水力过渡过程开展数值模拟,分析了相继甩负荷工况下机组流量变化率和运行轨迹与尾水管进口压力最小值之间的联系。结果表明,存在某一最不利相继甩负荷间隔时间使得两台机组第一波流量变化率的时域不同步程度达到最大,则对应的尾水管进口压力达到最小,且此时先甩和后甩机组运行轨迹点分别在特性曲线反S区上弯点和下弯点。研究结果可为抽水蓄能电站尾水管进口压力极值计算提供参考。

**关键词:**抽水蓄能电站;相继甩负荷;间隔时间;尾水管进口压力;流量变化率;运行轨迹

**中图分类号:** TV743

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)05-0093-04

## 1 引言

对多台机组共用同一水力单元的抽水蓄能电站,机组间水力联系十分复杂。当部分机组甩负荷后,由此产生剧烈变化的水锤压力将通过压力钢管和输水隧洞传递到岔管处,对同一水力单元的其他未甩负荷机组产生干扰并可能诱发相继甩负荷工况。与常规机组不同的是,可逆式机组特性曲线存在反S区,当机组在反S区运行时较小的转速变化可引起较大的流量变化,从而引起较大的水锤压力。多台机组相继甩负荷工况使得机组在该区间运行时水锤压力变化更为剧烈和复杂,主要表现为相继甩负荷工况下尾水管进口压力较同时甩负荷工况大幅度下降,而这将严重威胁输水系统安全<sup>[1]</sup>。因此相继甩工况尾水进口压力变化是抽水蓄能电站水力过渡过程研究中的难点和热点问题。刘蓉等<sup>[2,3]</sup>指出后甩机组流量变化在特定条件下可对先甩机组产生很大的水头叠加,导致尾水管进口压力最小值出现在先甩机组;CHEN SHENG等<sup>[4]</sup>指出相继甩负荷机组之间的流量变化不同步是尾水管进口压力剧烈变化的

根本原因,且后甩机组流量变化率与尾水管进口压力最小值密切相关;储善鹏等<sup>[5]</sup>指出尾水管进口压力最小值出现在机组特性曲线“反S”下弯点附近。相继甩负荷间隔时间是影响尾水管进口压力最小值的重要因素,但鲜有研究可明确表达间隔时间与尾水管进口压力最小值之间的内在联系。为此,本文基于瞬变流理论,利用特征线法对双机一洞布置型式抽水蓄能电站相继甩负荷工况开展数值模拟,分析了间隔时间与尾水管进口压力最小值的内在联系,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

## 2 理论分析

图1为双机一洞布置型式的抽水蓄能电站输水发电系统示意图。

忽略水体弹性和阻力系数,<sup>#</sup>2机组所在尾水支洞和尾水主动水流动力方程为:

$$H_{T_2} - H_{CD} = \frac{1}{g} \frac{L_{D2}}{A_{D2}} \frac{dQ_2}{dt} \quad (1)$$

$$H_{CD} - H_D = \frac{1}{g} \frac{L_D}{A_D} \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

式中, $H_{T_2}$ 为<sup>#</sup>2机组尾水管进口处水头; $H_{CD}$ 为

**收稿日期:** 2022-06-17, **修回日期:** 2022-08-14

**基金项目:** 浙江省重大水利科技项目计划(RA2011)

**作者简介:** 张永进(1972-),男,教授级高级工程师,研究方向为水电站和长距离输水工程系统布置和结构设计, E-mail: zyj7208@mail.zdwp.net

**通讯作者:** 储善鹏(1992-),男,硕士、工程师,研究方向为抽水蓄能电站水力过渡过程, E-mail: 1516292453@qq.com

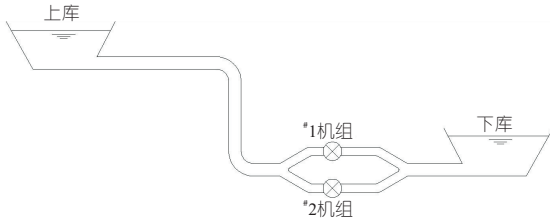


图 1 双机一洞布置型式的抽水蓄能电站输水发电系统示意图

Fig. 1 Water diversion power generation system of the pumped storage power station with layout of two turbines and one tunnel

尾水管管处水头;  $H_D$  为下库水位;  $L_D$ 、 $L_{D2}$  分别为尾水主洞、#2 机组所在尾水支洞长度;  $A_D$ 、 $A_{D2}$  分别为尾水主洞、#2 机组所在尾水支洞截面积;  $Q$  为主洞流量,  $Q = Q_1 + Q_2$ ,  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为 #1、#2 机组流量。

由式(1)、(2)可得:

$$H_{T2} = \frac{1}{g} \frac{L_D}{A_D} \frac{dQ_1}{dt} + \frac{1}{g} \left( \frac{L_D}{A_D} + \frac{L_{D2}}{A_{D2}} \right) \frac{dQ_2}{dt} + H_D \quad (3)$$

由式(3)可知, #2 机组尾水管进口处水头同时受 #1、#2 机组流量变化率的影响, 且受 #2 机组流量变化率影响更大。

相继甩负荷工况由于后甩机组间隔一段时间后再甩负荷, 实质上延长了导叶关闭时间, 所以与同时甩负荷相比, 主洞流量变化率  $dQ/dt$  较小。由  $dQ/dt = dQ_1/dt + dQ_2/dt$  可知,  $dQ/dt$  变小,  $dQ_1/dt$ 、 $dQ_2/dt$  不一定均变小, 有可能是  $dQ_1/dt$  减小的同时  $dQ_2/dt$  增大。规定 #1 机组为先甩机组, #2 机组为后甩机组。根据式(3), 由于受  $dQ_2/dt$  的影响更大, 后甩机组  $H_{T2}$  可能出现较同时甩负荷工况相比大幅度降低的现象。对于布置型式如图 1 的抽水蓄能电站而言, 两台机组相继甩负荷间隔时间可影响  $dQ_1/dt$ 、 $dQ_2/dt$  的变化过程最终使尾水进口压力大幅度降低。

### 3 数值模拟

#### 3.1 基本方程

描述有压管道瞬变流的运动方程和连续方程分别为:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|V|V}{2gD} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \theta = 0 \quad (5)$$

式中,  $H$  为测压管水头;  $V$  为流速;  $f$  为摩擦系数;  $D$  为管道直径;  $\theta$  为有压管道轴线与水平线的夹角;  $a$  为水锤波速。

式(4)、(5)可简化为特征线方程:

$$C^+ : H_{Pi} = C_P - B_P Q_{Pi}$$

$$C^- : H_{Pi} = C_M + B_M Q_{Pi} \quad (6)$$

式中,  $C_P$ 、 $B_P$ 、 $C_M$ 、 $B_M$  为前一时刻的已知量。

#### 3.2 工程实例基本资料

某抽水蓄能电站输水发电系统见图 1, 两条支洞对称布置, 两台机组参数一致。输水主洞和支洞参数见表 1, 机组参数见表 2。机组导叶关闭规律为 30 s 一段直线。

表 1 输水主洞和支洞参数

Tab. 1 Parameters of main tunnel and branch tunnel for water conveyance

部位	长度/m	直径/m	部位	长度/m	直径/m
引水主洞	1 134.93	6.2	尾水支洞	161.79	5.2
引水支洞	120.67	3.0	尾水主洞	762.64	7.6

表 2 机组参数

Tab. 2 Parameters of turbines

参数	取值	参数	取值
额定出力/MW	350.00	额定转速/(r · min <sup>-1</sup> )	428.6
额定流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	87.60	转动惯量/(t · m <sup>2</sup> )	5 800
额定水头/m	459.00	转轮直径/m	2.5

#### 3.3 数值模拟计算分析

数值模拟计算选取的工况为在最大上下库水头差和机组额定出力运行前提下, 两台机组间隔一段时间后相继甩全负荷。为研究间隔时间对尾水进口压力的影响, 选取不同的间隔时间分别开展相继甩负荷工况过渡过程数值模拟。图 2 为间隔时间为 1、3、4.5、6 s 对应的流量变化率和尾水管进口压力。

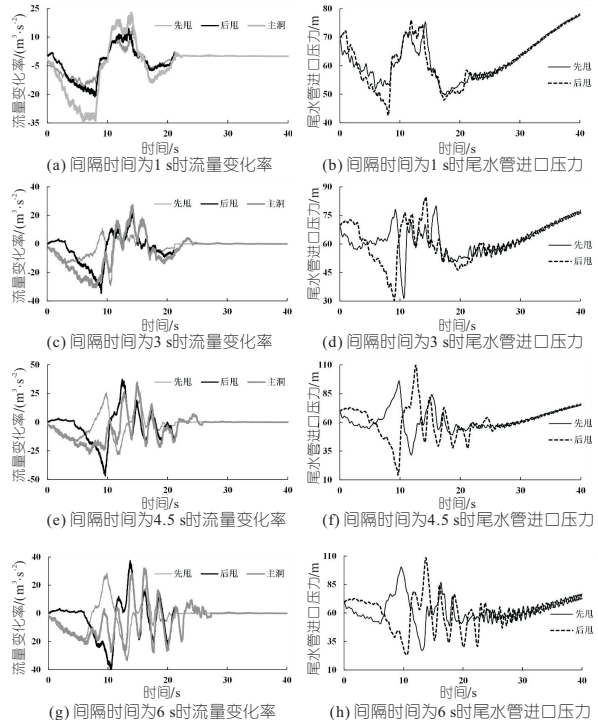


图 2 不同间隔时间流量变化率和尾水管进口压力

Fig. 2 Flow rate and pressure at draft tube inlet of different interval times

由图 2 可知,当间隔时间较小时, # 1、# 2 机组的流量变化率随时间变化趋势较为一致,主洞流量变化率大于 # 2 机组流量变化率。当间隔时间大于一定时间后, # 2 机组流量变化率将超过主洞流量变化率,因此此时 # 1 机组流量变化率为正,其水锤压力上升。究其原因在于当 # 1 机组甩负荷后的最初时段内, # 1 机组蜗壳进口水头上升, # 1 机组尾水管进口水头下降,并经岔管传递至 # 2 机组,从而导致 # 2 机组蜗壳进口和尾水管进口的压力差加大,故其引用流量也加大。当 # 2 机组相继甩负荷前,其流量已大于零时刻的流量,且此时流量变化率为正,在关闭规律不变的情况下,甩负荷后其流量变化率必大于同时甩负荷,且流量变化率由初始的正转为负,在此双重作用下,只要间隔时间大于某特定时间,相继甩负荷后 # 2 机组的流量变化率必然大幅增大。在主洞流量变化率因相继甩负荷间隔时间延长而减小的前提下, # 1 机组流量变化率必然呈反向变化,即先从负值减小为 0,再增大为正值, # 1 机组流量在甩负荷后将反向增大,冲击转轮的水流动能亦随之增大, # 1 机组转轮出现第二波峰值,但随着导叶继续关闭, # 1 机组流量变化率并不会一直正向增大,一段时间后将由正转负,直至减小为零。当后甩负荷的 # 2 机组尾水管进口压力大幅下降的原因是两台机组流量变化率在时域上不同步。故可判断存在某一相继甩间隔时间,使 # 1、# 2 机组的流量变化率第一波差值(两者同时出现)达到最大,则对应的 # 2 机组尾水管进口压力达到最小。

表 3 为各间隔时间对应的流量变化率和尾水进口压力。由表 3 可知,当 # 1 机组流量变化率最大值(正向第一波)和 # 2 机组流量变化率最大值(负向第一波)之间的差值达到最大时(间隔时间为 4.5 s),后甩负荷的 # 2 机组尾水管进口压力最小。当两者差值越大时,意味着两台机组流量变化率的时域不同步程度越大,造成两台机组的时域压力分布差异越大,后甩机组尾水管进口压力越小。

表 3 各间隔时间对应的流量变化率和尾水进口压力

Tab.3 Flow rate and pressure at draft tube inlet of interval time

间隔时间/s	# 1 机组流量变化率最大值(正向第一波)/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-2</sup> )	# 2 机组流量变化率最大值(负向第一波)/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-2</sup> )	尾水进口压力最小值/m
3	10.19	-34.60	30.15
3.5	16.66	-36.13	24.87
4	21.92	-40.82	19.74
4.5	26.03	-46.92	14.12
5	25.79	-47.23	14.24
5.5	27.87	-43.41	17.60
6	27.66	-39.17	23.61
7	27.25	-28.64	32.53

图 3 为间隔时间为 3、4.5、6 s 时两台机组运行轨迹。图 3 中 A 点均表示后甩机组尾水管进口压力最小值出现时刻对应的后甩机组运行轨迹点, B 点均表示后甩机组尾水管进口压力最小值出现时刻对应的先甩机组运行轨迹点。图 4 为可逆式机组特性曲线反 S 区间。由图 2(e)、(f)及图 3(b)可知,当间隔时间为 4.5 s 时,尾水管进口压力最小值为 14.12 s(出现在后甩机组),此时后甩机组运行轨迹点位于反 S 区间下弯点附近,而先甩机组运行轨迹点位于反 S 区间上弯点附近。由图 4 可知,可逆式机组特性曲线反 S 区间的上弯点和下弯点的特征为极小的单位转速变化可引起极大的单位流量变化。因此在极短时间内,若引起极小的单位转速变化,则 |dQ/dt| 极大。当间隔时间为 4.5 s 时,先甩机组运行轨迹点反 S 区间上弯点附近,故 |dQ<sub>1</sub>/dt| 较大;后甩机组运行轨迹点反 S 区间下弯点附近,故 |dQ<sub>2</sub>/dt| 较大,这与表 3 中的内容一致。故相继甩工况下最不利间隔时间的特征为当尾水管进口压力最小值出现在后甩机组时,先甩机组运行轨迹点在水轮机制动区反向运动(向上),并在上弯点附近;后甩机组运行轨迹在水轮机制动区正向运动(向下),并在下弯点附近,此时两台机组流量变化率最大值(正负向第一波)之间的差值达到最大。

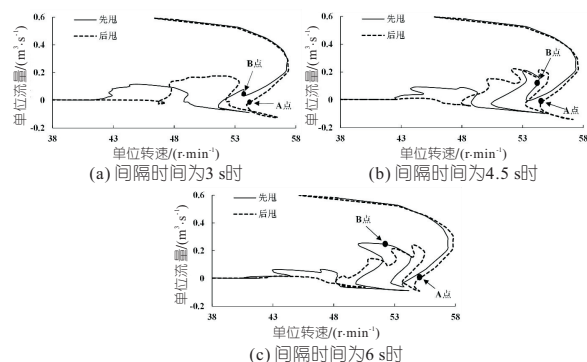


图 3 间隔时间为 3、4.5、6 s 时两台机组运行轨迹  
Fig.3 Running track of two turbines of interval time is 3 s, 4.5 s and 6 s

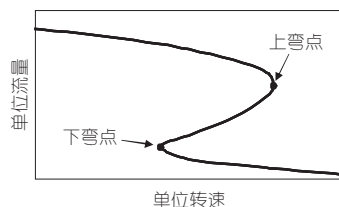


图 4 可逆式机组特性曲线反 S 区间  
Fig.4 Inverse S-curve of the pump-turbine

## 4 结论

a. 针对双机一洞布置型式的抽水蓄能电站,

基于瞬变流理论和特征线法,对相继甩负荷工况下水力过渡过程开展数值模拟,结合可逆式机组特性曲线特点,分析了相继甩负荷间隔时间和尾水管进口压力最小值之间的内在联系。

**b. 结果表明,存在最不利相继甩间隔时间,当尾水管进口压力最小值出现在后甩机组时,先甩机组运行轨迹点在水轮机制动区上弯点附近,后甩机组运行轨迹在水轮机制动区下弯点附近,此时的两台机组流量变化率最大值(正负向第一波)之间差值最大。**

**参考文献:**

[1] 张健,卢伟华,范波芹,等. 输水系统布置对抽水蓄

能电站相继甩负荷水力过渡过程影响[J]. 水力发电学报,2008,27(5): 158-162.

[2] 刘蓉,杨建东. 抽水蓄能电站一洞两机相继甩负荷分析[J]. 水力发电学报,2017,36(4): 71-77.

[3] ZENG W, YANG J D, TANG R B. Extreme water-hammer pressure during one-after-load shedding in Pumped-storage stations [J]. Renewable energy, 2016, 99:35-44.

[4] CHEN SHENG, WANG JING, ZHANG JIAN, et al. Transient behavior of two-stage load rejection for multiple units system in pumped storage plants [J]. Renewable energy, 2020, 160:1012-1022.

[5] 储善鹏,何伟. 抽水蓄能电站尾水管进口压力变化内在机理研究[J]. 水电能源科学,2022,40(8): 194-197.

## Study on Relationship Between Interval Time of Successive Load Shedding and Minimum Pressure of Draft Tube Inlet

ZHANG Yong-jin<sup>1</sup>, CHU Shan-peng<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Zhejiang Flood Protection Technology Center, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** The purpose of the paper is to explore connection mechanism between interval time and pressure at draft tube inlet in successive load shedding case. Based on transient flow theory and method of characteristics, numerical simulation calculation of transition process in the successive load shedding case for pumped storage power station with layout of two turbines and one tunnel was carried out. The relationship between flow rate, running track of turbines and minimum pressure at draft tube inlet was analyzed. The result shows that there is a certain most unfavorable interval time making the time-domain asynchronous degree of first wave flow rate in two turbines maximized and the pressure at draft tube inlet is the minimum. At the same time, running track point of the first load shedding turbine is near the upper bending point in the inverse S-region of characteristic curve and running track point of the last one is near the lower bending point. The conclusion can provide a reference for calculation of extreme value of pressure at draft tube inlet in the pumped storage power station.

**Key words:** pumped storage power station; successive load shedding; interval time; pressure at draft tube inlet; flow rate; running track

\*\*\*\*\*  
(上接第 21 页)

## Hydrological Regime Analysis of Breeding Period for Four Major Chinese Carps in Downstream of Xinjiang River After Cascade Junction Operation

ZHANG Yue<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, MAO Wei<sup>2</sup>, YAN Ru-yu<sup>3</sup>, TAO Yan<sup>1</sup>, LING Ming<sup>1</sup>, JI Yong<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Senior Waterway Affairs Center, Nanchang 330038, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** To analyze the potential influence of the construction and operation of the cascade junction on the hydrologic regime of four major Chinese carps spawning sites in the downstream of the Xinjiang River, 21 parameters were selected to establish the hydrological index system of fish spawning sites. The one-dimensional hydrodynamic model was adopted to analyze the hydrological regime of Daxidu spawning site before and after the construction of the cascade junction. The range of variability approach was used to analyze the hydrological changes of spawning grounds during the breeding period before and after the construction of cascade junction. The results show that the flow during the breeding period decreases after the operation of the cascading junction, which made the variation range of water flow limited in a small range. Furthermore, the number of high flow pulse decreased, which reduced the stimulation signal to spawning of four large fishes. This study quantified the impact of the construction of cascade junction in the downstream of the Xinjiang River on the spawning grounds during the breeding period, and provided scientific guidance for the design of the local hub operation scheme.

**Key words:** cascade junction; four major Chinese carps; breeding period; hydrological index system; Xinjiang River