

# Study on Broken-Line Open or Shut Mode of Guide Blade on Transient Process of Hydropower Station

Lei Hu, Li Guo

Yunnan Huadian Jinsha River Hydropower Development Corporation Limited, Kunming Yunnan  
Email: [lei\\_hu2006@yahoo.com](mailto:lei_hu2006@yahoo.com), [guoli0804@126.com](mailto:guoli0804@126.com)

Received: Aug. 25<sup>th</sup>, 2015; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2015; published: Sep. 21<sup>st</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Attention is concentrated on law of guide vane opened or closed. Analysis and computation for regulating guarantee of dam-rear power station at different law of guide vane were made to enable result to be compared. It's confirmed that the broken-line shut mode of guide blade is better than the closure of straight line to low maximum pressure at the end of spiral housing and maximum momentary overspeed of unit when unit is closed. So broken-line open or shut mode of guide blade should be give priority than the closure of straight line in the process of the designing and transforming for dam-rear power station.

## Keywords

Dam-Rear Power Station, Broken-Line Open or Shut Mode of Guide Blade, Computation for Regulating Guarantee

---

# 机组导叶分段启闭规律优化研究

胡磊, 郭立

云南华电金沙江中游水电开发有限公司, 云南 昆明  
Email: [lei\\_hu2006@yahoo.com](mailto:lei_hu2006@yahoo.com), [guoli0804@126.com](mailto:guoli0804@126.com)

收稿日期: 2015年8月25日; 录用日期: 2015年9月15日; 发布日期: 2015年9月21日

文章引用: 胡磊, 郭立. 机组导叶分段启闭规律优化研究[J]. 电力与能源进展, 2015, 3(4): 79-84.  
<http://dx.doi.org/10.12677/aepe.2015.34012>

## 摘要

对水电站机组导叶启闭规律进行系统的研究, 对应不同的启闭规律进行调保计算并进行分析比较, 证实分段关闭规律优于直线关闭规律, 采用分段关闭时蜗壳末端压力和机组转速上升有相应的减小, 有利于水电站安全经济运行, 由此提出在设计过程和对电站改造过程中对直线关闭就能满足规范要求的坝后式电站应优先考虑采用导叶分段关闭。

## 关键词

坝后式水电站, 导叶折线启闭规律, 调节保证计算

## 1. 引言

在水轮机调节系统大波动过渡过程中, 为了最大限度的降低水击压力和转速升高, 可以采用增大机组转动惯量  $GD^2$ 、增大压力钢管直径或增设调压井等措施[1]。相对于这些工程措施而言, 采用合理的启闭规律是改善水力过渡过程问题的首选手段。因为它不需要增添其它设备或增加工程量, 增大投资。为解决这一问题, 许多学者进行了大量的研究, 沈祖谔等提出对采用直线启闭不能满足规范要求的机组采用分段启闭, 并开发了 WINDOWS 界面下水力-机械过渡过程仿真计算软件[2]; 唐红给出了引水式水电站水轮机调保两段关闭计算实例[3], 但这些主要是针对直线启闭不能满足规范要求的水电站。目前对于采用直线启闭就能满足规范要求的水电站机组导叶启闭规律依旧为直线启闭规律。为了探讨采用直线启闭就能满足规范要求的水电站机组导叶关闭规律, 本文将从水电站机组导叶启闭规律出发, 通过某水电站具体计算, 发现对于采用直线启闭就能满足规范要求的水电站机组导叶若改采为分段启闭规律, 水力过渡过程问题会进一步地得到改善。因此, 提出在设计过程和对电站改造过程中对直线关闭就能满足规范要求的坝后式电站应优先考虑采用导叶分段关闭。

## 2. 导叶启闭规律

导叶启闭规律主要是指水电站机组在甩负荷时所采用的一段直线关闭规律和多段折线关闭规律。折线启闭规律较直线启闭规律复杂。至今水电站所采用的导叶折线启闭规律通常为两段折线启闭, 不包括关闭末了的缓冲延长段。要采用折线启闭规律, 首先应确定折线的规律, 其次是折点的位置。

折线启闭规律分为先慢后快折线启闭规律和先快后慢折线启闭规律, 它主要取决于水轮机的类型和比转速: 对于低比速水轮机, 由于在等开度线上单位流量  $Q_{11}$  随着单位转速  $n_{11}$  升高而减少, 在机组甩负荷时, 即使导叶开度不变, 随着转速升高, 过流量减少, 在机组上游侧产生正水击, 下游侧产生负水击。为了减轻水击压力, 所以通常采用先慢后快折线关闭规律; 对于高比速水轮机, 在等开度线上  $Q_{11}$  是随  $n_{11}$  升高而增加, 在机组甩负荷时, 若导叶开度不变, 随着转速升高、过流量增大, 在机组上游侧产生负水击, 下游侧产生正水击, 所以可采用先快后慢折线关闭规律; 对于中比速水轮机, 等开度线上  $Q_{11}$  基本上不随  $n_{11}$  变化而变化, 所以可采用的导叶启闭规律, 视具体的情况而定。对于机组流量特性曲线比较平缓的常规水电站机组而言, 转速对流量几乎无影响, 机组过流特性在一定程度上类似阀门过流特性, 导叶启闭规律的主要控制对象为电站引水系统中产生的间接水锤大小, 根据传统水锤理论, 在中、低水头的常规电站中, 发生的多为极限水锤, 控制值出现在导叶关闭终了, 最大的间接水锤压强通常出现在机组导叶关闭过程终了附近, 水轮机导叶可采用“先快后慢”的关闭规律, 以提高开始阶段的水锤压强,

降低终了阶段的水锤值；而对于高水头常规水电站机组，则采用相反的“先慢后快”的调节规律。

可把一段直线关闭的两端看作是二段折线关闭的特例，则在中间必有一点为极值点，即最佳拐点，可使水击压力和转速上升最小。在拐点附近负压幅值最小或正压值最大；机组转速上升值则随着拐点的下移(即开度的变小)有减小的趋势，但变化量较小。

从一段关闭的试验成果可证实，机组输水系统的水击类型为极限水击，即最大水击压力值发生在导叶关闭的最后时刻，水击压力值随导叶关闭时间的增加而减小。假如在关闭过程的某一时刻，改变导叶关闭的速率，即先快后慢的方式，则最大水击压力会发生在此拐点处，相应最大水击压力值会小于相同关闭时间下的一段关闭值，第二段慢速关闭使水击压力变得均化；另一方面，折线关闭可减小与纵横座标( $\tau$ - $T_s$ )包围的面积，如图 1，这样可减小机组的转速上升。此外，导叶关闭时间较短，机组积蓄的能量较少，则机组转速的上升值减小。可见，在满足水击压力同等条件下，二段关闭对降低转速上升率有较明显效果。

### 3. 计算实例

在上节中，我们可以看到分段折线关闭有着较多的优点。若将直线关闭就能满足规范要求的水电站采用折线关闭规律，其关闭时间、蜗壳末端压力和机组转速上升会如何变化，是否得到改善,是否更有利于水电站安全经济运行，下面就云南省曲靖市某坝后式水电站为例进行调节保证计算。

#### 3.1. 电站基本资料及直线关闭调节保证计算值

##### 3.1.1. 电站基本资料

见表 1。

##### 3.1.2. 管道特性

见表 2。

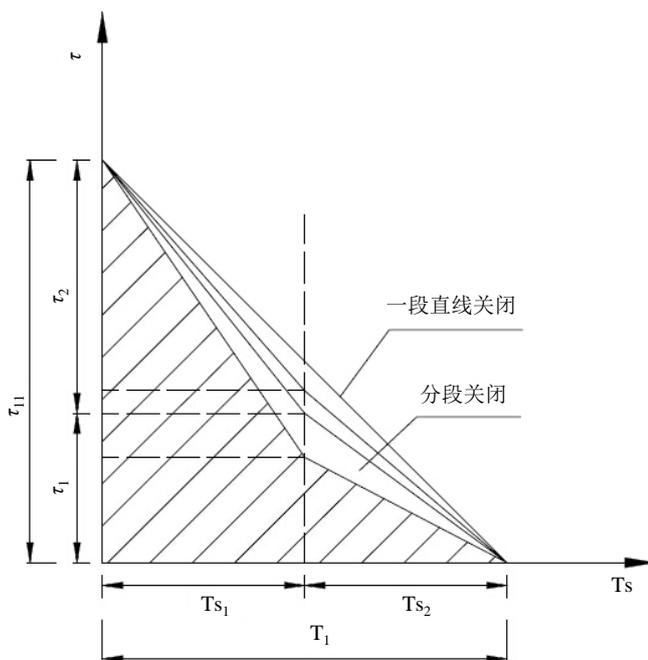


Figure 1. Schematic diagram of closing manner with zigzag line  
图 1. 两段折线关闭示意图

**Table 1. Basic document of hydropower station**  
**表 1. 电站基本资料**

水轮机型号:	ZZ560a-LJ-160	最大水头:	10.15 m
最小水头:	7.56 m	额定水头:	9.07 m
额定出力:	3990 kW	额定流量:	16.07 m <sup>3</sup> /s
最大水头、额定出力流量:	14.6 m <sup>3</sup> /s	额定转速:	300 r/min
飞逸转速:	680 r/min	最高效率:	91.43%
吸出高度:	-0.45 m	发电机GD <sup>2</sup> :	60 f·m <sup>2</sup>
电站布置形式:	坝后式电站		

**Table 2. Pipeline characteristics**  
**表 2. 管道特性表**

名称	H = H <sub>max</sub> , N = Nr		H = H <sub>r</sub> , N = Nr		平均波速
	LV (m <sup>2</sup> /s)	等价 V (m/s)	LV (m <sup>2</sup> /s)	等价 V (m/s)	
钢管	40.83		44.94		
蜗壳	42.21	3.77	46.46	4.15	916
尾水	39.02		42.95		
∑LV	122.06		134.35		

### 3.1.3. 采用直线关闭形式的计水锤及调节保证计算

用  $\rho = \frac{a_{cp} v_{cp}}{2gH_0} = \frac{916.01 \times 4.15}{2 \times 9.18 \times 9.07} = 21.34$ , 令  $T'_s > T_r$  为间接水锤且  $\rho\tau_0 > 1.5$ , 故为末相水锤。

本电站为单元引水, 按引水道最长一台机组甩负荷计算。在额定工况额定水头下, 导叶关闭规律采用一段直线关闭时, 导叶有效关闭时间为 9 s, 当机组甩全负荷, 机组最大速率上升 33.1%, 蜗壳末端最大压力上升 25.6%, 满足规范要求。

## 3.2. 采用分段关闭形式的水锤及调节保证计算

### 3.2.1. 快关闭时间[4]

导叶的快关闭时间可根据允许的速率上升值按下式确定:

$$T_s = \frac{n_r GD^2 (1 + 0.5\beta)}{182 N_r K f}$$

式中:  $T_s$  为快关闭时间(s);  $\beta$  为速率的允许上升值(相对值);  $K$  为导叶关闭时间的修正系数;  $f$  为水锤修正系数,  $f = (1 + \zeta)^{1.5}$ 。

将各值代入上式, 则  $T_s = 3.7$  s。

### 3.2.2. 慢关闭时间

导叶的慢关闭时间  $T_{ss}$  决定于允许的压力上升值, 因属极限水锤, 则:

$$T_{ss} = \frac{2 + \zeta}{\zeta} \cdot \frac{\sum L_i \bar{v}}{gH_r}$$

式中  $\zeta = 0.4$ ,  $\sum L_i = 32.40$ ,  $\bar{v} = 4.15$  m/s。将各值代入上式, 则  $T_{ss} = 4.53$ , 取为 4.5 s。

### 3.2.3. 导叶分段关闭拐点出现的时间和流量

导叶分段关闭拐点出现的时间 $T_{sg}$ :  $T_{sg} = KT_s$ , 导叶分段关闭拐点的流量: 根据  $\frac{Q_t}{T_{ss}} = \frac{Q_g}{T_s - T_{sg}}$  的关系有  $Q_g = \frac{Q_t(T_s - T_{sg})}{T_{ss}}$ , 式中,  $Q_t$  为机组正常发电流量( $m^3/s$ );  $Q_g$  为拐点流量( $m^3/s$ )。

将各值代入上式中, 则  $Q_g = 3.96 m^3/s$ 。

### 3.2.4. 分段关闭的水锤及转速变化计算[5]

拐点流速计算:

根据导叶开度与水轮机的引用流量成直线变化规律并与相对水锤压力的平方根成正比关系的假定(忽略转速影响因素), 则有:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{Q}{Q_0} = \tau\sqrt{1+h}$$

在分段关闭中, 按照上述规律, 则有:

$$\frac{\bar{V}_g}{\bar{V}_t} = \frac{Q_g}{Q_t}, \quad \bar{V}_g = \frac{\bar{V}_t Q_g}{Q_t}$$

式中,  $Q_g$ 、 $\bar{V}_g$  分别为拐点的流量和流速;  $Q_t$ 、 $\bar{V}_t$  分别为机组引用的正常流量和流速。

将各值代入上式中, 则  $\bar{V}_g = 0.34 m/s$ 。

### 3.2.5. 对分段启闭水锤压强及转速变化计算的分析

最大水锤压强和速率上升值:

在快关闭阶段, 水锤压力迅速上升到最大值, 并发生在拐点处, 流速由 $V_{max}$ 变化为 $\bar{V}_g$ , 以快关机时间 $T_s$ 和相应的流速变化梯度计算出的水锤压力上升值为其极限值, 由拐点的时间 $T_{sg}$ 计算出的速率上升值为最大速率, 应分别以最高静水头、设计水头下机组丢弃全部负荷为控制条件, 计算出水锤压强和转速变化值及尾水管的压力降低值, 看是否在规范的要求范围内: 在慢关闭阶段, 根据导叶二段关闭规律, 对于极限水击其最大升值出现在快关阶段, 故在慢关阶段, 不需作水锤验算, 管中流速的变化梯度比快关机时慢, 水锤压强呈下降趋势, 拐点流量已接近空载流量, 其速率上升值可忽略不计, 故也不需进行速率升值验算。

最大水锤压强和速率下降值:

对弃荷时, 最大反水击应在导叶关闭终了时刻发生, 故认为导叶关闭的总时间 $T_{ss}$ 和管道中的流速由 $V_{max}$ 变化为零为条件计算其值。对增荷时, 认为导叶开启规律是先慢后快, 拐点以后的流速变化较大, 故以快关机时间 $T_s$ 和导叶开启终了为条件计算其值, 并与反水击比较选定控制情况。

### 3.2.6. 计算结果

采用两段关闭规律, 第一段关闭时间为3.3 s, 第二段关闭时间为4.5 s。两段关闭总时间为7.8 s。导叶在拐点位置的流量为 $3.96 m^3/s$ , 流速为 $0.34 m/s$ 。

蜗壳末端最大压力上升不大于:

$$H'_{max} = (1 + \epsilon'_{max}) H_{max} = (1 + 0.218) \times 10.15 = 12.36 \text{ m水柱}。$$

最大转速上升不大于:

$$\beta_{max} = 25.2\%, \text{ 满足规范要求。}$$

### 3.3. 对比分析

两段关闭总时间比直线关闭有效时间短, 能更好地适应电力系统对水电厂快速关机的要求。一段直线关闭总时间为 9 s, 对于算例中坝后式水电站, 二段折线关闭总时间为 7.8 s, 比一段直线关闭时间减少了 1.2 s, 缩短了对电力系统的波动。

折线关闭较直线关闭时机组最大速率上升小, 采用直线关闭机组转速最大上升率为 33.1%, 比二段关闭大 7.9%, 可见, 采用导叶二段关闭更能有效地防止事故情况下的机组过速。

二段折线关闭时蜗壳末端最大压力偏小, 直线关闭蜗壳末端最大压力为 25.6%, 而二段关闭为 21.8%。可见, 分段关闭能够更好的防止管道爆裂。

可见, 直线分段关闭较直线关闭能更好的满足电站安全经济运行要求。在电站过水系统中, 蜗壳及尾水管中的水力现象是极为复杂的, 水锤只能近似地加以计算。在分段快慢关闭过程中, 假定导叶的开度与流量成直线比例关系, 拐点的流量接近水轮机的空载流量。在实际运行过程中, 由于各种情况的影响, 上述结果会产生一定的差别。

### 4. 结语

在导叶直线关闭和折线关闭都能满足规范要求时, 对于坝后式水电站导叶实行二段关闭, 能在合理有效的关机时间内, 更好的控制蜗壳末端压力及机组转速上升、更好的满足电站安全经济运行要求。因此, 采用合适的导叶折线关闭规律是个有效的、节约的办法。在设计及电站改造过程中, 采取导叶分段关闭规律的措施, 是解决调节系统大波动问题应优先考虑的方案。

### 参考文献 (References)

- [1] 沈祖谔 (2001) 水轮机调节. 第三版. 中国水利水电出版社, 北京, 232-262.
- [2] 沈祖谔, 孙昀 (2007) WINDOWS 界面下水力-机械过渡过程仿真计算通用软件. *水力发电*, 7, 57-59.
- [3] 唐红 (2007) 引水式水电站水轮机调保两段关闭计算. *甘肃水利水电技术*, 2, 128-129.
- [4] 湖北省水利勘测设计院主编 (1985) 小型水电站机电设计手册-水力机械. 水利电力出版社, 北京, 154-200.
- [5] 于波, 肖慧民 (2008) 水轮机原理与运行. 中国电力出版社, 北京, 42-95.