

水电站引水系统取消尾水调压室过渡过程计算研究

郑 源，刘德有，索丽生

(淮海大学水利水电工程学院，江苏南京 210098)

摘要 对洪家渡水电站引水系统在设置尾水调压室和取消尾水调压室两种情况下的过渡过程进行了计算研究. 计算表明, 通过考虑机组特性、优化机组导叶关闭规律及合理整定调速器参数, 该水电站取消尾水调压室的方案是可行的, 其各设计参数控制值基本上能满足设计要求. 计算成果已作为该电站设计方案比较的依据之一.

关键词 调压室 过渡过程 导叶关闭规律 转速上升率 内水压力

中图分类号 :TV732.5 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2000)02-0096-05

尾水调压室的功用是缩短尾水管道长度,减小甩负荷时尾水管的真空度,防止水柱分离,提高水电站的运行稳定性和供电质量. 但调压室一般尺寸较大,造价较高,占整个引水系统造价相当大的比例,因此,在什么条件下才需设置调压室历来是人们非常重视并进行过诸多研究的课题. 洪家渡水电站位于贵州省黔西县与织金县交界的乌江北源六冲河上. 电站的装机容量为 3×180 MW,设计水头 131 m,总设计流量 $3 \times 155 \text{ m}^3/\text{s}$. 该电站发电引水系统由 3 条引水隧洞、1 座地下厂房、1 座含公用上室的尾水调压室以及 3 条长为 247 m 的尾水隧洞组成,尾水调压室在 993.0 m 高程以上为 1 个 609 m^2 的公用上室,在 993.0 m 以下为 3 个独立的阻抗式调压室,其面积为 62.0 m^2 ,底板高程为 967.0 m,底部阻抗孔面积为 17.64 m^2 ,尾水闸门桥吊的轨道高程为 1004 m. 可作为上室一部分的尾调交通洞长度为 200 m,底板平均高程为 994.5 m,交通洞断面的形状为“城门洞”,宽 4.5 m,高 5.8 m(其中拱顶高 1.3 m),参见图 1. 该电站是否需要设置尾水调压室,可按照尾水调压室的下列公式^[1]进行判别.

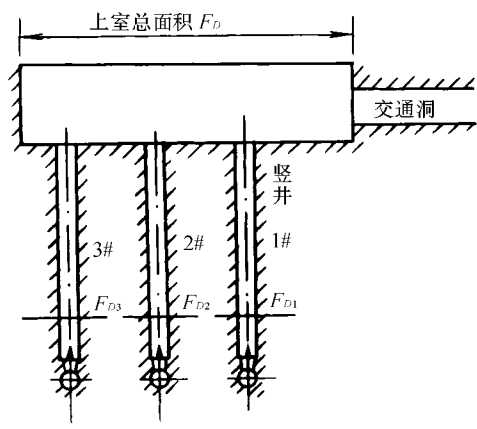


图 1 尾水调压室示意图
Fig.1 The tailwater surge chamber

$$L_{cr} = K \frac{gT_s}{2V_w} (8 - H_s - \varphi \frac{V_1^2}{2g}) \tag{1}$$

$$L'_{cr} = \frac{2L_{cr}}{1 + \frac{L_{cr}V_w}{gHT_s}} \tag{2}$$

式中: L_{cr} ——不设调压室的尾水洞的临界长度; V_w ——尾水洞中之流速; K ——考虑尾水管进口流速分布不均的修正系数,一般取 $0.7 \sim 0.8$; H_s ——水轮机的吸出高度; V_1 ——尾水管进口初始流速; φ ——考虑最大水锤降压与最大流速水头出现时间的相位差的系数,极限水锤取 $\varphi = 0.5$.

对于洪家渡水电站,按式(1),(2)可求得: $L_{cr} = 114.97 \text{ m} < 247 \text{ m}$; $L'_{cr} = 223.25 \text{ m} < 247 \text{ m}$. 由此可见,该水电站需要设置尾水调压室. 由于该公式未考虑机组特性及导叶优化关闭等因素,所以最终是否应设置尾水调压室,应通过较详细的水力系统过渡过程计算来确定.

1 水电站引水系统大波动过渡过程计算分析

1.1 大波动过渡过程计算分析原理

水电站引水系统大波动过渡过程计算的基本方程为^[2]

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{f|v|v}{2D} = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - v \sin \alpha + \frac{\alpha^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x}$$

由于式(3),(4)是拟线性双曲型偏微分方程,得出这组方程的闭合解是不可能的. 目前对上述两方程的求解广泛采用的是特征线法. 该方法首先把偏微分方程转化为常微分方程,然后用差分法求解常微分方程. 特征线法具有物理概念清晰、建立数学模型容易及编制电算程序方便等特点.

将方程(3),(4)转化为常微方程并沿特征线积分得

$$C^+ : H_P(t) = C_P - B_P Q_P(t)$$

$$C^- : H_P = C_M + B_M Q_P(t)$$

式中: $C_P = H_A(t - i\Delta t) + BQ_A(t - i\Delta t)$; $B_P = B + \alpha |Q_A(t - i\Delta t)|$; $C_M = H_B(t - i\Delta t) - BQ_B(t - i\Delta t)$; $B_M = B + \alpha |Q_B(t - i\Delta t)|$.

根据(5),(6)并考虑机组和尾水调压室的边界条件,由 $(t - i\Delta t)$ 时刻的 H_A, Q_A 和 H_B, Q_B 可求得任意时刻 t 的 H_P, Q_P .

1.2 大波动过渡过程计算研究的内容

洪家渡水电站引水系统大波动过渡过程计算研究的内容为: 在满足机组最大转速上升率 $\beta_{\max} \leq 45\%$ 、蜗壳进口最大内水压力 $H_{C\max} \leq 220\text{ m}$ 和转轮出口最小内水压力 $H_{D\min} \geq -6.0\text{ m}$ 的设计限制条件下,针对设置尾水调压室和取消尾水调压室两种设计方案进行大、小波动过渡过程计算,确定合理的导叶关闭规律和有关参数的设计控制值,并通过比较分析,探索取消尾水调压室的可行性.

1.3 大波动过渡过程计算结果及分析

1.3.1 导叶关闭规律的优化选择

导叶关闭规律的优化目标是:在满足机组最大转速上升率 $\beta_{\max}$ 不超过设计限定值的前提下,使蜗壳进口最大内水压力 $H_{C\max}$ 和转轮出口最大真空度 $|H_{D\min}|$ 尽可能地小. 经优化计算,求得本电站设置尾水调压室方案的最优导叶关闭规律为:总有效关闭时间 $T_s = 11\text{ s}$ 、转折点时间 $t_m = 3.3\text{ s}$ 、转折点导叶相对开度 $\tau_m = 0.61$ 的两段折线;取消尾水调压室方案的最优导叶关闭规律为:总有效关闭时间 $T_s = 11\text{ s}$ 、转折点时间 $t_m = 3.0\text{ s}$ 、转折点导叶相对开度 $\tau_m = 0.60$ 的两段折线. 参见图 2.

1.3.2 两种方案计算与比较

对取消尾水调压室与设置尾水调压室两种方案进行了各种工况的计算分析,计算成果见表 1 及图 3~图 6.

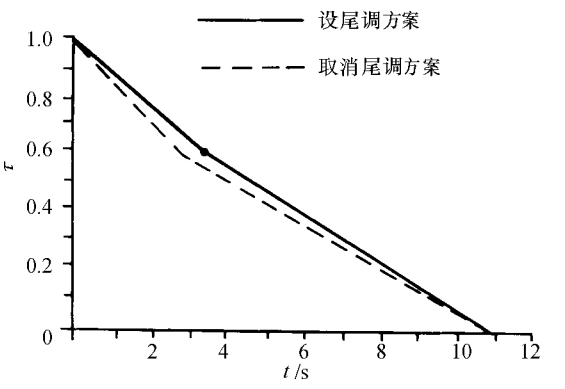


图 2 导叶关闭规律

Fig.2 Closing laws of the guide blades

表 1 取消尾水调压室与设置尾水调压室两种方案比较

计算工况	机组最大转速	蜗壳进口最大	蜗壳进口最小	转轮出口最大	转轮出口最小
	上升率	内水压力	内水压力	内水压力	内水压力
	$\beta_{\max}/\%$	$H_{\text{蜗壳进口max}}/\text{m}$	$H_{\text{蜗壳进口min}}/\text{m}$	$H_{\text{转轮出口max}}/\text{m}$	$H_{\text{转轮出口min}}/\text{m}$
取消尾水调室	44.694	204.279	102.491	32.513	-6.400
设置尾水调压室	43.157	204.018	102.790	26.995	-5.592

由表 1 可知,取消尾水调压室对转轮出口及尾水道沿线的最大内水压力影响较大,转轮出口最小内水压力比现定的设计限制值 -6.0 m 低 0.40 m ,其它各设计参数的过渡过程控制值变化不大,均能满足设计要求.

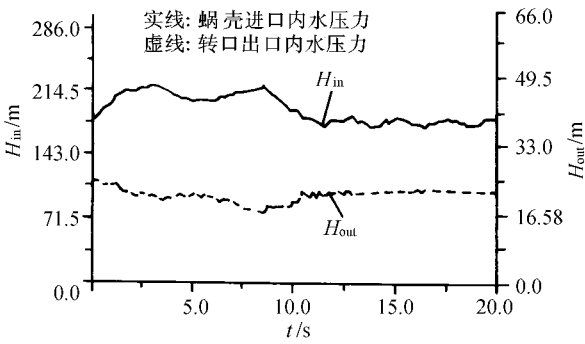


图3 设尾调、设计洪水位、3台机电负荷时蜗壳进口、转轮出口压力变化曲线

Fig.3 Provision the tailwater surge chamber and design flood level and load rejection of three units, spiral case inlet & runner outlet pressure variation curve

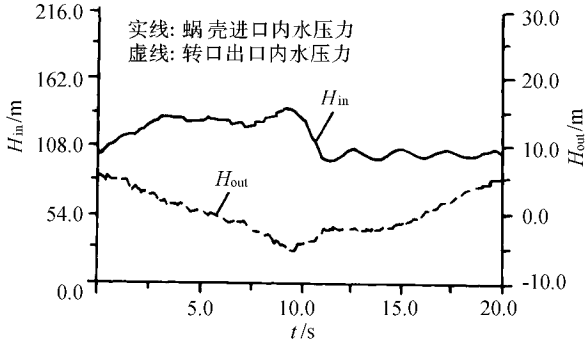


图4 设尾调、死水位、1台机电负荷时蜗壳进口、转轮出口压力变化曲线

Fig.4 Provision the tailwater surge chamber and dead water level and load rejection of one unit, spiral case inlet & runner outlet pressure variation curve

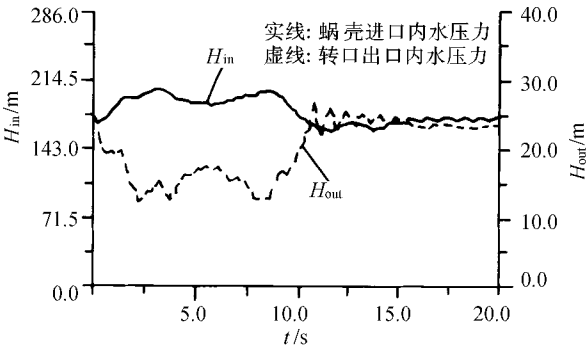


图5 取消尾调、设计洪水位、3台机电负荷时蜗壳进口、转轮出口压力变化曲线

Fig.5 Withdrawal the tailwater surge chamber and design flood level and load rejection of three units, spiral case inlet & runner outlet pressure variation curve

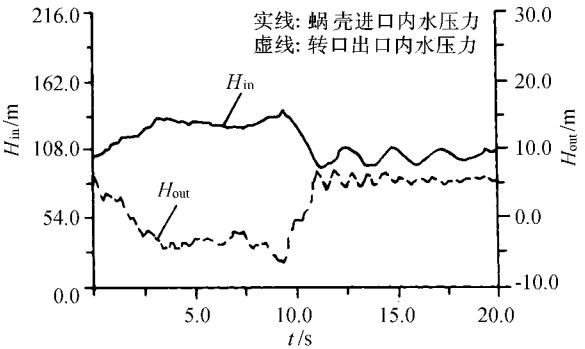


图6 取消尾调、死水位、1台机电负荷时蜗壳进口、转轮出口压力变化曲线

Fig.6 Withdrawal the tailwater surge chamber and dead water level and load rejection of one unit, spiral case inlet & runner outlet pressure variation curve

2 水力系统小波动稳定分析

2.1 小波动稳定分析原理

根据小波动稳定性分析的数学模型可写出洪家渡水电站小波动稳定分析的状态方程组,其矩阵形式为

$$DY = AY + Bx$$

小波动稳定性取决于矩阵 A 的特征值 λ_i (取消尾水调压室时 $i = 1, 2, 3$ 设置尾水调压室时 $i = 1, 2, 3, 4, 5$). 若记 $\lambda_i = \alpha_i + j\omega_i$ (α_i, ω_i 分别为实部和虚部), 则只有当 A 的所有的特征值的实部均为负数 (即所有的 $\alpha_i < 0$) 时, 系统才是稳定的, 否则系统不稳定.

2.2 计算工况与成果

对取消尾水调压室与设置尾水调压室各种工况进行了计算, 计算成果见表 2 及图 7 和图 8.

表 2 两种方案小波动计算成果

Table 2 At two alternative,calculating result of small fluctuation	
计算工况	A 的特征值
设置尾水调压室	
机组满负荷(不计调压室底部流速水头影响)	$-0.210 \pm 0.254j, -0.00994 \pm 0.152j, -0.0583$
机组满负荷(计调压室底部流速水头影响)	$-0.213 \pm 0.248j, -0.00317 \pm 0.152j, -0.0576$
机组部分负荷(不计调压室底部流速水头影响)	$-0.0808 \pm 0.0363j, -0.00813 \pm 0.164j, -1.02$
机组部分负荷(计调压室底部流速水头影响)	$-0.0801 \pm 0.0362j, -0.00476 \pm 0.164j, -1.02$
机组空载(不计调压室底部流速水头影响)	$-0.0151 \pm 0.0377j, -0.00372 \pm 0.168j, -1.79$
机组空载(计调压室底部流速水头影响)	$-0.0151 \pm 0.0377j, -0.00352 \pm 0.168j, -1.80$
取消尾水调压室	
机组满负荷	$-0.134 \pm 0.219j, -0.0585$
机组部分负荷	$-0.0804 \pm 0.0369j, -0.721$
机组空载	$-0.0151 \pm 0.0377j, -1.35$

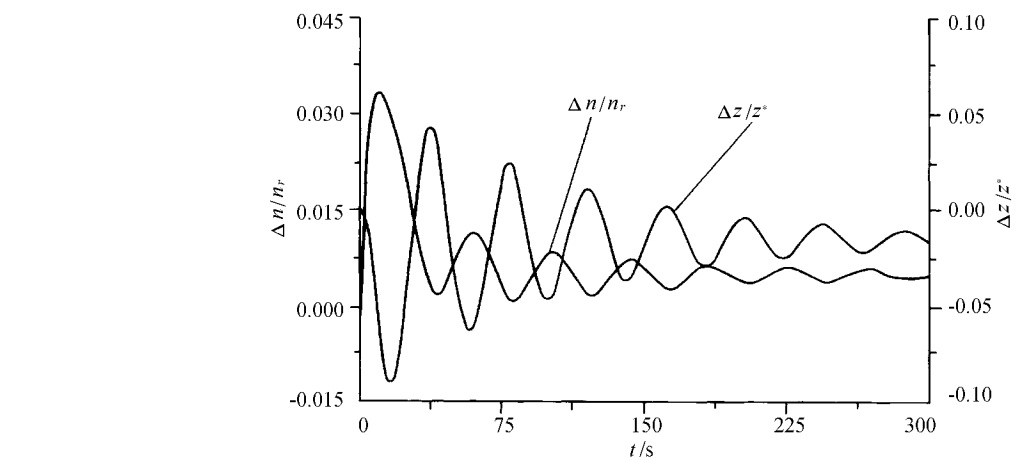


图 7 设尾调、满负荷运行、不计流速水头影响时转速、水位小波动过程线

Provision the tailwater surge chamber and operation at full load and ignore effect of current metre head,speed & water level hydrograph of small fluctuation

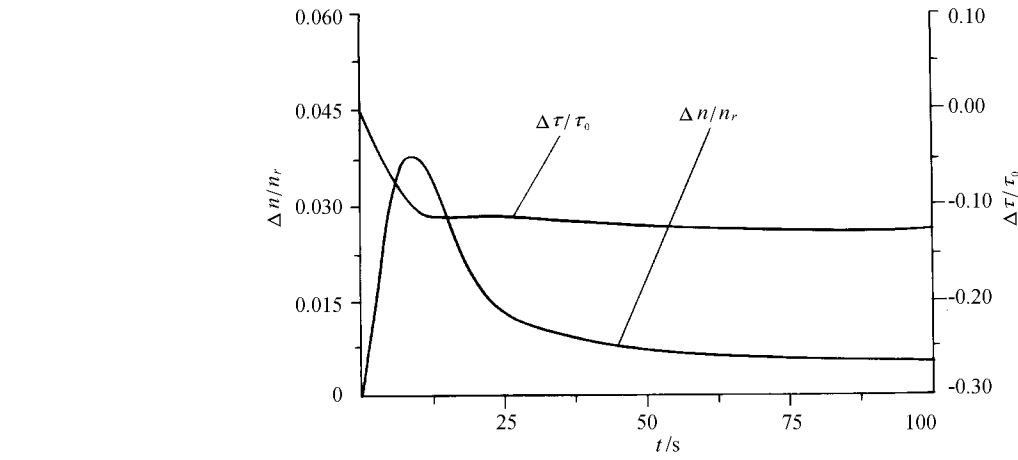


图 8 取消尾调、满负荷运行时转速、开度小波动过程线

Fig.8 Withdrawal the tailwater surge chamber and operation at full load,speed & opening hydrograph of small fluctuation

由表 2 可以看出：

a. 当调速器参数在常规取值范围内合理选择后,不论是设置尾水调压室还是取消尾水调压室,水力系统小波动都是稳定的,且当取消尾水调压室后,小波动的幅值增加,波动和稳定性变差,但衰减速度更快.

b. 若考虑调压室底部流速水头的影响,对于满负荷,特征值中实部绝对值最小值由 $-0.009\ 94$ 变为 $-0.003\ 17$,表示系统的稳定性变差 对于部分负荷和空载工况,由于调压室底部流速水头较小,所以影响较小.

3 结 语

a. 本电站取消尾水调压室后,其各设计参数的过渡过程控制值变化不大,除转轮出口最小内水压力比规定的设计限制值 -6.0 m 低 0.40 m 外,其它参数均能满足设计要求. 为简化输水系统布置并节省投资,若适当放宽转轮出口最小内水压力的限制条件或采取其它工程措施(如降低水轮机安装高程、加强补气等),即可取消尾水调压室. 但取消尾水调压室后,尾水道的最大内水压力明显增大,这可能会使尾水道的衬砌投资有所增加.

b. 通过对本电站水力-机械系统小波动稳定分析得知,本电站取消尾水调压室后,只要适当选取调速器有关调节参数,该系统在各种负荷运行工况的小波动调节过程仍然是稳定的,且衰减加快.

c. 若采用文献[1]推荐的设置尾水调压室后判别公式可知,本电站需要设置尾水调压室. 这说明,文献[1]中推荐的‘设置尾水调压室判别条件’是偏于保守的.

参考文献：

[1] 刘启钊,彭守拙.水电站调压室[M].北京 水利电力出版社,1995.1~5.
[2] Wylie E B,Streeter V L,Suo Lisheng. Fluid transients in system[M]. Engle Wood Cliffs, New Jersey :Prentice-Hall,Inc.,1993.37~45.

Computation Research of the Transition Process of the Diversion System at Hydropower Station

ZHENG Yuan, LIU De-you, SUO Li-sheng

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

Abstract :This paper presents the main results of the research on the transition process of the diversion system at the Hongjiadu hydropower station in the presence or absence of the tailwater surge chamber. The results show that it is feasible to remove the tailwater surge chamber at the station in consideration of the optimized closing of the guide blades and the properties of the units. The governing values of parameters can basically satisfy the requirement for design. The present achievements have been used as one of the important bases for comparison of alternatives of the station.

Key words :surge chamber ;transition process ;closing of guide blades ;rising ratio of rotational speed ;inside water pressure