

水电站变顶高尾水洞瞬变流计算及体型设计

邓命华,刘德有,周建旭

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 对水电站变顶高尾水洞内明满交替流计算方法及变顶高尾水洞体型设计进行了研究,介绍了变顶高尾水洞的工作特点.采用改进狭缝法模型,结合某大型水电站取消尾水调压室方案进行瞬变流计算,提出了明满交替流分界点的处理方法.分别针对具有不同顶坡、底坡和底宽的变顶高尾水洞体型在不利工况下的瞬变流计算成果进行比较分析.结果表明,变顶高尾水洞具有一定的尾水调压室作用,若适当地选取体型参数可不设尾水调压室,顶坡对整个尾水系统的影响非常大,底坡和底宽的影响相对较小.

关键词 变顶高尾水洞;明满交替流;狭缝法;尾水洞体型设计

中图分类号 TV74;TV133.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2003)04-0436-04

大型水电站的尾水隧洞在过流形式上可采用 3 种不同的水流设计方案,即无压隧洞、有压隧洞和变顶高尾水洞^[1].所谓变顶高尾水洞是指具有顶坡或同时具有底坡,即洞高沿程改变,洞内有可能出现明满交替流的一种新型尾水隧洞.这种尾水洞的工作特点是下游水位与洞内某处洞顶衔接,从而将整个尾水洞分成有压满流段和无压明流段两部分,明满流交界面随下游水位的变化而变化.当下游水位较低时,水轮机的淹没水深较小,但无压明流段长,有压满流段短,过渡过程中的水锤压力波动小,从而可保证尾水管进口断面的最小压力满足设计要求.当下游水位升高时,无压明流段的长度逐渐变短,有压满流段的长度逐渐变长,负水锤压力增大,但此时水轮机的淹没深度较大,且有压满流段流速减小,从而仍可保证尾水管进口断面的最小压力满足设计要求.因此,变顶高尾水洞具有一定的尾水调压室的作用^[2],它在确保整个尾水系统能够满足调节保证计算和机组稳定运行要求的同时,可取代尾水调压室或将尾水调压室的面积大大减小,从而可节省大量投资,且为地形地质条件不宜设大型尾水调压室的水电站提供了一种可选择的方案.随着我国西部水力资源的开发,变顶高尾水洞在水电站尾水系统设计中具有广阔的应用前景.

1 明满交替流的计算方法

1.1 基本方程

由于变顶高尾水洞中水流流态为明满交替流^[3],整个尾水洞被明满流交界面分隔成有压满流段和无压明流段两部分,所以在进行变顶高尾水洞水力过渡过程计算时,需联立明渠非恒定流和有压非恒定流基本方程.

明渠非恒定流的连续方程和动量方程分别为^[4]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

(1)

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

(2)

其中

$$c = \sqrt{gA/B} \qquad J_f = \frac{n^2}{R^{4/3}A^2}Q|Q|$$

式中: Q ——断面流量; h ——断面水深; A ——过水断面面积; B ——水面宽; i ——明渠坡度; x ——沿渠长的水平距离; t ——时间; g ——重力加速度; c ——明渠水流流动的面波波速; n ——曼宁系数; R ——水力半径.

有压非恒定流的连续方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

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

其中

$$J_f = \frac{af}{2gDA^2} Q |Q|$$

式中： h ——测压管水深； i ——管道沿程坡度； a ——水锤波速； D ——管道直径； f ——摩擦系数。其余符号意义同上。

1.2 计算数学模型

1.2.1 狭缝法模型(PCW 模型)^[5]

变顶高尾水洞瞬变流计算的难点在于尾水洞内变动的明满流交界面,要跟踪它的轨迹是相当困难的。为了避免这一困难,Cunge 和 Wegner 提出了 PCW 模型:在有压管道的管顶加一条假想的狭缝,使有压流流速等于明渠面流波速,而所有其余的参数均不改变,从而把明满交替流统一视为明流,这也就是常称的狭缝法。

采用上述方法,明渠非恒定流与有压非恒定流可用同一组方程描述,即

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

$$\left(1 - \frac{BQ^2}{gA^3}\right) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + J_f - i = 0 \tag{6}$$

当计算满流时, $B = gA/a^2$,即为假想的狭缝缝宽。式(5)、式(6)按 Preissman 4 点隐格式离散成差分方程组后结合边界条件即可求解。

1.2.2 改进狭缝法模型

对于一般的明渠非恒定流,Preissman 4 点隐格式是无条件收敛的,但对于变顶高尾水洞中瞬变流,当采用狭缝法计算时,由于以假想的明渠非恒定流替代有压非恒定流,而明流和满流之间波速相差很大,因明满交替流波速的不连续性,可能导致计算结果不收敛。为了寻求收敛性好的明满交替流求解方法,可把明满交替流基本方程转化成标准的双曲型方程组,然后采用逆风差分格式离散求解。

根据以上分析,将连续方程乘一因子 $l^\pm = -v \pm c$ 后加到动量方程上^[6],可得

$$\left(Bl^+ \frac{\partial h}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + c^+ \frac{\partial Q}{\partial x}\right) = k \qquad \left(Bl^- \frac{\partial h}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + c^- \frac{\partial Q}{\partial x}\right) = k \tag{7}$$

其中 $l^\pm = -v \pm c \qquad k = gA(i - J_f) + v^2 \frac{\partial A}{\partial x} \qquad v = \frac{Q}{A} \qquad c^\pm = v \pm c$

式(7)为双曲型方程组,可采用逆风差分格式离散,在 (m,n) 点进行差分,对 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial t}$ 项采用向前差分,

$\frac{\partial h}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ 项采用向后差分,重力项、摩擦项、 $\frac{\partial A}{\partial x}$ 项按 $n+1$ 时层,其他按 n 时层计算,可离散得差分方程组。该差分方程组为非线性方程组,采用 Newton-Raphson 法求解,即可转化为一系数矩阵为稀疏矩阵的线性化方程组。

1.3 明满交替流分界点处理

如图 1 所示,在明满流分界点的上游侧为有压流,下游侧为无压流。因此,在明满流分界点处,水深等于该点洞高,在计算过程中,任意时刻均以此为判断条件,随时跟踪明满流分界点的移动,假定明满流分界点在变顶高尾水洞的节点 i 和 $i+1$ 之间,令明满流分界点为 f ,则下标为 f 的参数均表示明满流分界点的参数,节点 i 和 f 之间可列出如下方程:

$$\left. \begin{aligned} a_{2i}h_i^{n+1} + b_{2i}Q_i^{n+1} + c_{2i}h_f^{n+1} + d_{2i}Q_f^{n+1} &= e_{2i} \\ a_{1f}h_i^{n+1} + b_{1f}Q_i^{n+1} + c_{1f}h_f^{n+1} + d_{1f}Q_f^{n+1} &= e_{1f} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

节点 f 和 $i+1$ 之间可列出如下方程:

$$\left. \begin{aligned} a_{2f} h_f^{n+1} + b_{2f} Q_f^{n+1} + c_{2f} h_{i+1}^{n+1} + d_{2f} Q_{i+1}^{n+1} &= e_{2f} \\ a_{1,i+1} h_f^{n+1} + b_{1,i+1} Q_f^{n+1} + c_{1,i+1} h_{i+1}^{n+1} + d_{1,i+1} Q_{i+1}^{n+1} &= e_{1,i+1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

各方程中的系数和右端项的第 2 个下标表示节点号,在各计算式中采用该节点的相关参数.式(8)和式(9)中消去参数 h_f^{n+1}, Q_f^{n+1} , 整理化简可得仅有节点 i 和 $i+1$ 参数的两个方程式,并入到变顶高尾水洞的整体带状矩阵中,成为第 $2i$ 和 $2i+1$ 行元素及相应的右端项,通过计算可得各节点参数,回代入式(8)中可得明满流分界点的水深 h_f^{n+1} 和流量 Q_f^{n+1} .若水深 h_f^{n+1} 近似等于洞高,则进入下一时段计算,否则重新迭代计算.图 2 这种情况较为复杂,但仍然可以类似处理.

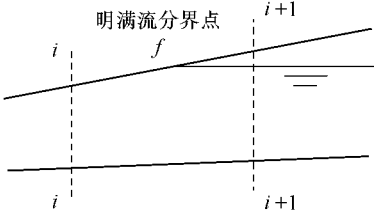


图 1 明满流分界点
Fig.1 Separation point of unsteady free-surface pressurized flow

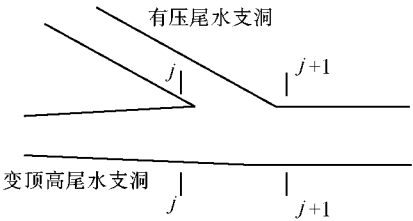


图 2 尾水分岔点
Fig.2 Bifurcation of tailwater tunnel

2 不同体型变顶高尾水洞瞬变流比较计算分析

某大型水电站尾水系统采用了不设尾水调压室的变顶高尾水洞设计方案,具体布置形式如图 3.当变顶高尾水洞顶坡为 0.04、底坡为 0.01、上游水位为 380.00 m、尾水位为 265.30 m 时,以尾水洞 6 号段的中间断面作为考察对象,采用改进狭缝法模型(经试算,PCW 模型此时不收敛,对本工程不适用),其瞬变流计算成果如图 4~6 所示.

当不断调整变顶洞的顶坡、底坡和底宽时,可分别对各种不同体型的变顶洞在相同工况(不利工况)下的瞬变流计算成果进行比较,如表 1~3 所示.

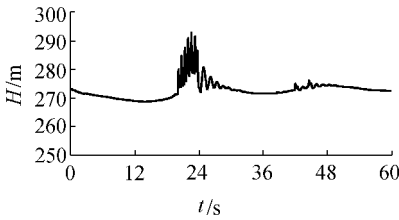


图 4 变顶洞某断面水头过程线
Fig.4 Variation of water head for a section of a sloping ceiling tunnel

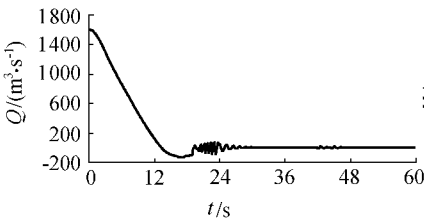


图 5 变顶洞某断面流量过程线
Fig.5 Variation of discharge through a section of a sloping ceiling tunnel

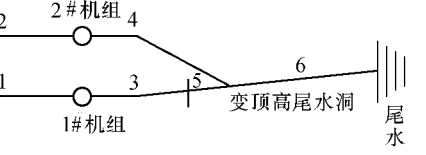


图 3 变顶高尾水洞方案平面布置
Fig.3 Plan of tailwater tunnel with sloping ceiling

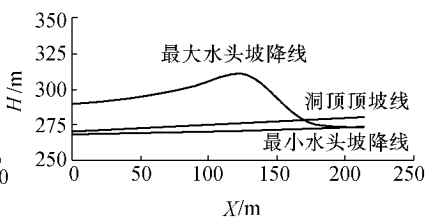


图 6 变顶洞沿线的水头坡降线
Fig.6 Water head gradient along the tunnel

表 1 底坡为 0.03、底宽为 20 m 时
不同顶坡变顶洞瞬变流计算成果比较

Table 1 Calculated results of transient flow in sloping ceiling tunnels with different gradients of top slope for a base slope gradient of 0.03 and a bottom width of 20 m				
编号	顶坡	最小水头/m	最大水头/m	尾水管进口最小水头/m
S01	0.03	242.210	316.631	< - 8.000
S02	0.04	259.800	309.914	- 6.723
S03	0.05	269.385	300.630	9.737
S04	0.06	269.410	294.788	9.896

表 2 顶坡为 0.04、底宽为 20 m 时
不同底坡变顶洞瞬变流计算成果比较

Table 2 Calculated results of transient flow in sloping ceiling tunnels with different gradients of base slope for a top slope gradient of 0.04 and a bottom width of 20 m				
编号	底坡	最小水头/m	最大水头/m	尾水管进口最小水头/m
S05	0.00	263.734	300.683	4.222
S06	0.01	261.797	303.620	0.641
S07	0.02	260.491	306.249	- 4.586
S08	0.03	259.800	309.914	- 6.723

3 结 论

a. 变顶高尾水洞具有一定的尾水调压室作用 ,但在尾水系统水力过渡过程中 ,尾水洞内明满流交界面处 ,可能引起较大幅值的压力和流量振荡 ,如图 4~6 所示 .通过对不同体型变顶洞瞬变流的比较计算可知 ,适当选取变顶洞的顶坡、底坡、底宽等参数 ,可使振荡幅度控制在设计允许的范围内 ,同时能保证尾水管进口真空度满足设计要求 ,并保证机组安全稳定地运行 .

b. 从表 1 可以看出 ,顶坡对整个尾水系统的影响非常大 ,顶坡坡度改变较小也将引起压力和流量较大的变化 .总的趋势是 ,顶坡倒坡坡度越大 ,压力振荡的幅度越小 ,尾水管进口的真空度也越小 ,而且可有效防止空气滞留 ,但当坡度增大到一定值后 ,影响不再十分明显 .同时 ,顶坡也极大地影响工程量 ,顶坡坡度的增大将使工程量增大 ,顶坡过大也会使出口断面加大很多 ,从而可能影响尾水洞的边坡稳定性 .

c. 从表 2 可以看出 ,总的来说 ,底坡的变化对整个尾水系统的过渡过程影响较小 .底坡的倒坡坡度越小 ,压力振荡的幅度越小 ,尾水管进口的真空度也更易满足设计要求 .设计中底坡可采用倒坡 ,以减少开挖量 .

d. 从表 3 可以看出 ,底宽变化对变顶洞内压力振荡幅度的影响不大 ,但对尾水管进口真空度影响较大 .总的来说 ,底宽增大则压力振荡幅值变小 ,尾水管真空度情况也变好 ,但底宽的增加将使整个工程量增加 .

表 3 顶坡为 0.04、底坡为 0.03 时
不同底宽变顶洞瞬变流计算成果比较

Table 3 Calculated results of transient flow in sloping ceiling tunnels with different bottom widths for top and base slope gradients of 0.04 and 0.03

编号	底宽/m	最小水头/m	最大水头/m	尾水管进口 最小水头/m
S09	19	234.134	312.300	< - 8.000
S10	20	259.800	309.914	- 6.723
S11	21	261.285	306.872	- 2.253
S12	22	262.307	304.288	0.007

参考文献 :

[1] WIGGERT D C. Transient flow in free-surface pressurized system[J]. Journal of the Hydraulics Division ,ASCE ,1972 98(HY1) 232—244.

[2] 杨建东 ,陈鉴治 ,陈文斌 ,等 .水电站变顶高尾水洞体型研究 [J]. 水利学报 ,1998(3) 9—12.

[3] BETAMIO de Almeida ,KOELLE E. Fluid transients in pipe networks[M]. Southampton :Computational Mechanics Publication ,1992. 148—203.

[4] WYLIE E B ,STREET V L ,SUO Li-sheng. Fluid transients in system[M]. Englewood Cliffs ,NJ :Prentice Hall ,1993. 20—34.

[5] CHARLES C S ,JAMES A C ,KIM S L. Transient mixed flow models for storm sewers[J]. Journal of Hydraulics Engineering ,ASCE ,1983 , 109(11) :1485—1503.

[6] 樊红刚 ,陈乃祥 ,刘立宪 ,等 .明满交替流动仿真计算分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版) 2000 40(11) 63—66.

Transient flow calculation for sloping ceiling tailwater tunnels and their body-type design for hydropower stations

DENG Ming-hua , LIU De-you , ZHOU Jian-xu

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

Abstract :A study is made on the methods for calculation of the unsteady free-surface pressurized flow in tailwater tunnels with a sloping ceiling and their body-type design , and an introduction is given to their operational characteristics . Based on the improved slot model , a transient flow calculation is performed to verify the scheme of canceling the tailwater surge tank at a large-scale hydropower station , and a separation point treatment method for the unsteady free-surface pressurized flow is proposed . Aiming at tailwater tunnels with different top and base slopes and different bottom widths , a comparative analysis is made on the calculated results under some adverse conditions . The results indicate that , by reasonable selection of the body-type parameters , the tailwater tunnel with a sloping ceiling can replace the tailwater surge tank , so it is feasible to cancel the surge tank , and that the gradient of the top slope has a great effect on the tailwater system , while the effects of the gradient of the base slope and bottom width are relatively small .

Key words :tailwater tunnel with sloping ceiling ; unsteady free-surface pressurized flow ; slot method ; body-type design of tailwater tunnel