

双机共变顶高尾水洞系统水力干扰分析

周建旭,张 健,刘德有

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 采用有压管道特征线法、跟踪明满流分界点的明渠改进狭缝法和状态方程数值计算的联合算法,结合相应的边界条件,研究变顶高尾水洞方案的水力干扰问题,并与尾水调压室方案进行了比较分析,结果表明 变顶高尾水洞方案水力干扰对运行机组稳定性和调节品质的影响较尾水调压室方案小,此水力特性为变顶高尾水洞的应用提供了可靠的比选依据.

关键词 水电站 双机共管路 变顶高尾水洞 改进狭缝法 水力干扰

中图分类号 TV134.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)06-0661-04

当水电站采用首部或中部开发方式,双机共尾水管路布置是一种典型的布置方案.若尾水系统长约 150 ~ 600 m,且下游水位变幅较大时,则可能的布置形式除有压隧洞(设尾水调压室)以外,变顶高尾水洞方案亦是一种新型的、合理的优选比较方案^[1].在运行过程中,变顶高尾水洞内可能出现明满交替流动,此时下游水位与洞内某一点衔接,在下游水位变化时,无压明流段的长度发生变化,均能有效保证尾水管进口断面的最小压力满足设计要求,因此类似于尾水调压室的作用,具有较大的工程意义.对于设变顶高尾水洞方案,不可避免地会出现机组间的水力干扰问题,即同一单元 2 台均在正常运行的机组,若其中一台机组甩负荷或增负荷,尾水分岔点的流态发生变化甚至出现明满交替流动,另外一台仍在正常运行的机组的水头、出力、转速等必然发生变化,从而影响水电站的供电品质.因此,基于变顶高尾水洞方案,采用有压管道特征线法、跟踪明满流分界点的明渠改进狭缝法和状态方程数值计算的联合算法,进行水力干扰分析.结合尾水调压室方案,比较分析两种方案下水力干扰对运行机组的稳定性和调节品质的影响程度,为方案比选提供可靠的依据.

1 双机共变顶高尾水洞系统水力干扰计算方法

1.1 有压系统的特征线法

有压管道系统水锤计算的特征相容方程^[2]为

$$C^+ : H_{Pi} = C_P - B_P Q_{Pi} \quad C^- : H_{Pi} = C_M + B_M Q_{Pi} \tag{1}$$

式中: C_P, B_P, C_M, B_M ——与 $t - \Delta t$ 时刻相邻节点水头和流量相关的常数; H_{Pi}, Q_{Pi} ——时刻 t 节点 i 的水头和流量. 设 Δx 为特征网格管段长度,满足库朗条件 $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$, Δt 为计算步长, a 为水锤波速.

1.2 明渠计算的改进狭缝法

明渠非恒定流计算的基本方程^[2,3]为

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} = gA(i - J_f) \tag{2}$$

式中: Q ——断面流量; h ——断面水深; A ——过水断面面积; B ——水面宽. 明渠流动的面波波速 $c = \sqrt{gA/B}$, 曼宁公式 $J_f = \frac{n^2}{R^{4/3} A^2} Q |Q|$, 其中 n 为糙率, R 为水力半径.

鉴于传统的狭缝法模型(PCW 模型)^[4]可能导致计算结果不收敛,为了寻求迭代收敛性尽可能好的明满流求解方法,将连续方程乘一因子 $l^\pm = -\frac{Q}{A} \pm \sqrt{gA/B}$ 后加到动量方程上,然后在点 (m, n) 进行差分, $\frac{\partial}{\partial t}$ 项

采用向前差分,对 $\frac{\partial}{\partial x}$ 项采用不同的差分格式,而重力项、摩擦项、 $\frac{\partial A}{\partial x}$ 项按 $n+1$ 时层,其他按 n 时层计算,可得差分方程

$$a_1 h_{m-1}^{n+1} + b_1 Q_{m-1}^{n+1} + c_1 h_m^{n+1} + d_1 Q_m^{n+1} = e_1 \quad a_2 h_m^{n+1} + b_2 Q_m^{n+1} + c_2 h_{m+1}^{n+1} + d_2 Q_{m+1}^{n+1} = e_2 \quad (3)$$

其中 $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i (i=1,2)$ 为系数,下标表示断面位置,上标表示时层.

利用式(3)以及相应的初始条件和边界条件,可以得到联立方程组,经过 Newton-Raphson 法线性化,可得一整体带状矩阵.

在明满流计算过程中,随时跟踪明满流分界点的位置,具体处理方法见文献[5].在尾水系统实际布置中会出现一类较复杂的分岔点,即有压尾水支洞出口位于变顶高尾水洞中间的某个位置,见图 1.在尾水分岔点处,主管道为变顶高尾水洞,1 号机尾水支管为变顶高尾水洞,2 号机尾水支管为有压管道.该边界条件可做如下处理.

令分岔点上游侧节点号为 j ,下游侧节点号为 $j+1$,结合有压管道的特征线方程,对式(3)做适当修改,使之满足该边界条件.

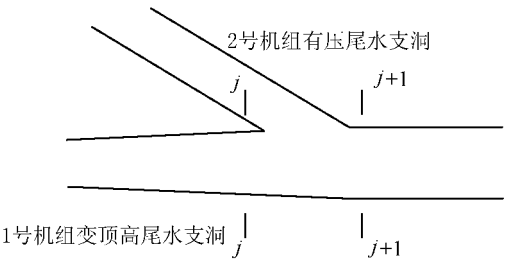


图 1 尾水分岔点

Fig.1 Bifurcation of tailwater tunnel

令 2 号机有压尾水支管末端节点为 m ,其正向方程为 C^+ :

$H_{Pm} = C_P - B_P Q_{Pm}$,又依据连续条件有 $Q_{Pm} + Q_j = Q_{j+1}, H_{Pm} = h_j + h'_j, H_{Pm} = h_{j+1} + h'_{j+1}$ (其中 h'_j 和 h'_{j+1} 为对应节点洞底高程),又有 $h'_j = h'_{j+1}$,代入式(3)可得

$$F_1 = h_j - B_P Q_j + B_P Q_{j+1} + h'_j - C_P = 0 \quad F_2 = -B_P Q_j + h_{j+1} + B_P Q_{j+1} + h'_{j+1} - C_P = 0 \quad (4)$$

式(4)中各参数意义同前,引入各断面参数的增量表示形式,经过 Newton-Raphson 法线性化,即作为节点 j 的第二个式子和节点 $j+1$ 的第一个式子,成为变顶高尾水洞整体带状矩阵的第 $2j$ 和 $2j+1$ 行元素及相应的右端项,其中双下标系数与右端项的意义和计算式不同于式(3). 即有

$$\begin{bmatrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} & d_{1j} & & & & \\ & & 1 & -B_P & 0 & B_P & & \\ & & 0 & -B_P & 1 & B_P & & \\ & & & & & & a_{2,j+1} & b_{2,j+1} & c_{2,j+1} & d_{2,j+1} \end{bmatrix} X = \begin{Bmatrix} e_{1j} \\ -F_1 \\ -F_2 \\ e_{2,j+1} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中向量 $X = [\Delta h_{j-1}, \Delta Q_{j-1}, \Delta h_j, \Delta Q_j, \Delta h_{j+1}, \Delta Q_{j+1}, \Delta h_{j+2}, \Delta Q_{j+2}]^T$ 表示相应断面参数的增量.

1.3 受扰机组的稳定分析

采用并联 PID 型调速器模型[6],结合机组运动方程[6],并且均以常微分方程描述,可形成状态方程组.受扰机组相对转速 φ 和相对开度 μ 为主要状态变量,输入扰动为受扰机组的出力变化,考虑可能的非线性特性,采用合理的数值计算方法(如 4 阶龙格-库塔法)求解.

1.4 水力干扰计算联合算法

鉴于水力干扰计算中涉及扰动机组的增荷或甩荷过程,受扰机组的稳定分析以及变顶高尾水洞的过渡过程计算(变顶高尾水洞方案)较复杂,具体计算流程可描述为:(a) $t + \Delta t$ 时刻扰动机组参数 H, Q, n 计算→(b)有压管道水锤计算(以及明满流计算)→(c) $t + \Delta t$ 时刻受扰机组参数 H, Q, P_m 计算→(d) $t + \Delta t$ 时刻受扰机组稳定分析.

步骤(a)中采用单纯形寻优法确定机组的运行位置.第二个箭头中联系参数为尾水分岔点各断面的水头(或水深)和流量.

1.5 受扰机组调节品质分析

设 n_0 为转速初始值, n_t 为扰动后的转速稳定值, $n_{\max}$ 为第一振荡波峰(或波谷)值, n_1 为第一振荡波谷(或波峰)值, n_2 为第二振荡波峰(或波谷)值, $\Delta n_0 = n_t - n_0, \Delta n_1 = n_1 - n_t, \Delta n_2 = n_2 - n_t$. 定义调节时间 T_p : 转速振荡峰值与稳定值 n_t 间的相对偏差不大于 $\pm 0.4\%$ 对应的时间. 振荡次数 x : 振荡时间 T_p 内振荡波峰个数的一半. 最大偏差 $\Delta n_{\max}$: $\Delta n_{\max} = n_{\max} - n_t$; 超调量 δ : $\delta = \Delta n_1 / \Delta n_{\max}$; 衰减度 Ψ : $\Psi = (\Delta n_{\max} - \Delta n_2) / \Delta n_{\max}$. 依据以上定义,可进行受扰机组调节品质分析.

2 变顶高尾水洞方案水力干扰研究和比较分析

某大型水电站,采用双机共尾水管路布置,由于尾水隧洞的长度较短,约 250 m,考虑设变顶高尾水洞方案,同时因尾水系统近似满足设置尾水调压室的临界条件,可结合尾水调压室方案,对上述两个方案分别进行水力干扰过渡过程计算分析,比较两种方案在水力干扰方面的优劣.两种方案的具体布置形式如图 2 和图 3 所示,其中变顶高尾水主洞的出口顶高程为 278.0 m,尾水分岔点顶高程约为 270.0 m.

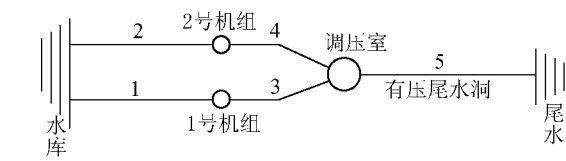


图 2 尾调方案平面布置

Fig.2 Plan of tailwater surge tank

本文采用有压管道特征线法、明渠改进狭缝法和状态方程数值计算的联合算法,进行水力干扰计算研究.为了进行较详细的分析比较,结合 3 种计算工况,1 台机组运行,1 台机组甩去全部负荷,检验运行机组的稳定性,结果见表 1.表 2 列出了运行机组的调节品质,以描述甩荷机组对运行机组的水力干扰影响程度.图 4 和图 5 绘出了 D-02 工况运行机组转速和出力的时变过程线,可以直观地对两种方案的水力干扰特性进行比较分析.

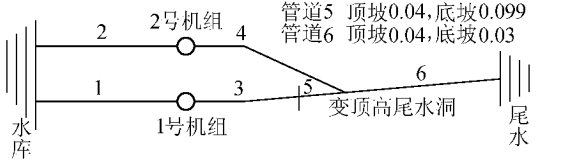


图 3 变顶高尾水洞方案平面布置

Fig.3 Plan of tailwater tunnel with sloping ceiling

表 1 水力干扰计算工况

Table 1 Cases of hydraulic disturbance calculation

工况代号	上游水位 /m	下游水位 /m	工作水头 /m	初始功率 /MW	水头
D-01	380	265.3	112.93	762	最大水头
D-02	380	275.4	102.08	762	加权水头
D-03	370	283.0	84.20	633	最小水头

表 2 不同方案水力干扰计算成果(运行机组)

Table 2 Calculated results on hydraulic disturbance in different cases(operating unit)

方案	工况 代号	调节时间 (±0.4%)/s	振荡次数 x/次	最大偏差 $\Delta n_{\max}/(r \cdot \min^{-1})$	超调量 $\delta/\%$	衰减度 $\Psi/\%$	调压室水位 波动幅度/m	明满流分界点 移动幅度/m	运行机组出力 摆动幅度/MW
尾调方案	D-01	210.0	4.0	1.198	87.31	31.22	6.72		44.4
	D-02	> 500		2.589	97.88	17.80	7.47		78.2
	D-03	> 500		4.283	107.21	16.51	7.71		116.0
变顶高尾水洞方案	D-01	60.0	1.0	0.681	85.46	62.56		3.70	21.6
	D-02	34.0	1.0	2.527	76.93	80.49		77.70	120.1
	D-03	90.0	1.5	3.329	65.52	80.74			99.5

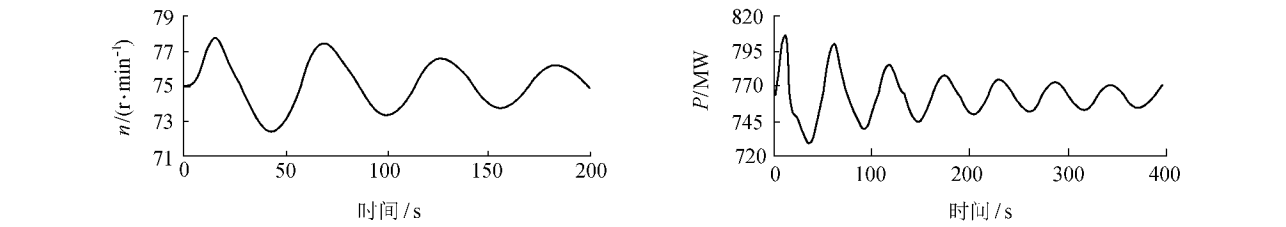


图 4 尾调方案 D-02 工况运行机组转速和出力过程线

Fig.4 Variation of rotational speed and output of operating unit in D-02 case for tailwater surge tank scheme

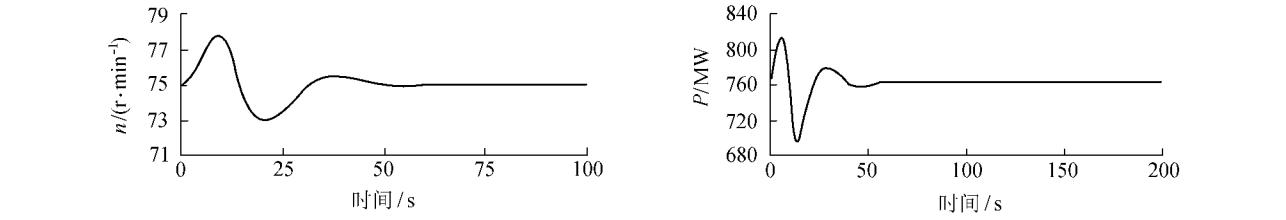


图 5 变顶高尾水洞方案 D-02 工况运行机组转速和出力过程线

Fig.5 Variation of rotational speed and output of operating unit in D-02 case for scheme of tailwater tunnel with a sloping ceiling

综合分析以上计算成果可知:

a. 对于设变顶高尾水洞方案,下游分岔点的水位发生变化(可能为明流或满流),不可避免地存在一定的水力干扰;与尾水调压室方案相比,水力干扰对运行机组稳定性的影响要小得多,主要表现为对应工况的调节时间明显缩短,振荡次数减少,衰减度明显增大,超调量减少,即调节品质较优.从波形图上看转速很快接近稳定,机组出力虽仍有较大摆动,亦迅速趋于稳定.

b. 考虑设变顶高尾水洞方案,对于工况 D-03,尾水洞中均为满流,一台机组甩荷引起的变顶高尾水洞中的过渡过程对运行机组的影响较小,动态品质相对较好;对于工况 D-02,虽然尾水洞中出现明满流,但分岔点始终处于满流状态,动态品质亦相对较好;对于工况 D-01,分岔点始终处于明流状态,则变顶高尾水洞中明流段水位的波动叠加在调节过程中,致使调节品质变差.

c. 从水力干扰对运行机组的稳定性和调节品质来看,变顶高尾水洞方案明显优于尾水调压室方案.

3 结 论

变顶高尾水洞是一种新体型尾水道,当尾水系统长约 150 ~ 600 m,且下游水位变幅较大时,变顶高尾水洞方案无疑是一种合理的比较优选方案.

本文基于有压管道特征线法、跟踪明满流分界点的明渠改进狭缝法和状态方程数值计算方法,给出了较复杂尾水分岔点的处理方法,形成适于双机共管路系统水力干扰计算分析的联合算法.研究变顶高尾水洞方案的水力干扰问题,并与尾水调压室方案进行了比较分析,得出变顶高尾水洞方案水力干扰对运行机组的稳定性和调节品质影响明显小于尾水调压室方案,为方案比选提供可靠的依据.

参考文献:

- [1] 赖旭,陈鉴治,杨建东.变顶高尾水洞水电站机组运行稳定性研究[J].水力发电学报,2001,(4):103—107.
- [2] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Li sheng. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc, 1993. 37—60, 380—399.
- [3] 樊红刚,陈乃祥,刘立宪.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.
- [4] 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.
- [5] 邓命华,刘德有,周建旭.水电站变顶高尾水洞瞬变流计算及体型设计[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(4):436—439.
- [6] 沈祖诒,田树棠,支培法.水力机械优化设计和计算机辅助分析[M].南京:河海大学出版社,1995.228—256.

Hydraulic turbulence calculation for tailwater tunnel system with a sloping ceiling shared by two units

ZHOU Jian-xu, ZHANG Jian, LIU De-you

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

Abstract In combination with corresponding boundary conditions, the hydraulic turbulence calculation for the tailwater tunnel system with a sloping ceiling shared by two units was studied with a unified method, in which the characteristic line method for pressurized conduits, the improved slot method for open channel by tracing the separation points of free flow and full flow, and numerical method of state equation were combined. The comparison of the result with that of the tailwater surge tank scheme shows that the hydraulic turbulence in the tailwater tunnel system has little influence on the stability of operation and regulation quality of units. The results provide a reliable basis for selection of the tailwater tunnel scheme with a sloping ceiling.

Key words hydropower station; two units sharing a common pipeline; tailwater tunnel with a sloping ceiling; improved slot method; hydraulic turbulence