

碗牛坝水电站突甩负荷过渡过程数值计算

何文学¹, 李茶青¹, 申景涛², 冯家涛¹, 杨建国¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 西农校区 712100; 2 陕西省水利厅, 陕西 西安 710006)

[摘要] 以有压管道非恒定流微分方程组为基础, 结合碗牛坝水电站具体边界条件, 建立了基于特征线法的描述水电站突甩负荷过渡过程的数值模型, 全面细致地模拟出了该电站突甩负荷过渡过程中任一时刻压力管道任一断面各水力要素和机组各工况参数的瞬变规律, 为该电站的设计及安全稳定运行提供了技术依据, 对类似工程也有一定的参考价值。

[关键词] 有压管道; 非恒定流; 过渡过程; 数值计算

[中图分类号] TV134.2

[文献标识码] A

水电站 压力管道 突甩负荷

TV732.4

碗牛坝水电站属中高水头引水式水电站, 其压力管道系统既有管材、管径的变化, 又含串联、三分岔、水轮机等边界条件。采用传统的调节保证计算方法难以满足工程设计和安全稳定运行的要求, 必须采用更为精细的数值模拟。目前, 水电站突甩负荷过渡过程的数值计算普遍采用特征线法, 此方法已为大多数工程采用并取得了令人满意的成果^[1,2]。本文用此方法对碗牛坝水电站压力引水系统水力过渡过程进行数值分析与计算。

1 工程概况

碗牛坝水电站位于陕西省洋县境内, 属低坝引水式水电站。该电站共装设3台水轮机, 装机容量 $3 \times 1\,250\text{ kW}$, 水轮机型号 HL160-WJ-60, 发电机型号 SFW1250-6/1180, 调速器型号 YT-600, 导叶中位线高程 518.5 m, 单机引用流量 $1.9\text{ m}^3/\text{s}$ 。前池设有溢流堰, 堰顶高程 597.91 m, 前池设计水位 597.86 m, 最低尾水位 515.00 m, 静水头 $H_0 = 82.86\text{ m}$ 。压力管道布置形式见图1, 管道特性参数见表1。

表1 压力管道特性参数、水击波速、分段数目一览表

管道号	管长/m	管径/m	壁厚/mm	管材	糙率	水击波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	调整后波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	分段数目
①	21.493	1.6	12	钢管	0.012	939.4	908.4	10
②	125.00	1.6	120	预砼	0.014	939.4	943.4	56
③	11.593	1.6	12	钢管	0.012	939.4	980.0	5
④	13.700	0.9	12	钢管	0.012	1 084.8	1 158.1	5
⑤	7.700	0.9	12	钢管	0.012	1 084.8	1 084.8	3
⑥	13.700	0.9	12	钢管	0.012	1 084.8	1 158.1	5

注: 管道号见图1。

[收稿日期] 2000-08-23

[作者简介] 何文学(1964—), 男, 副教授, 硕士。

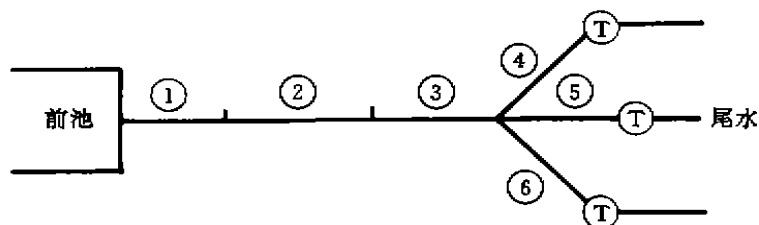


图 1 压力管道布置形式

2 数学模型的建立

有压管道非恒定流基本方程^[2]为:

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\text{运动方程} \quad g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2d} = 0. \quad (2)$$

式(1)、式(2)可采用特征线法求其数值解。特征线法要求复杂管路系统各管段具有相同的时间增量 Δt ，在此，采用调整波速法^[3]确定出了各管段共同的时间增量 Δt ($\Delta t = 0.0024 \text{ s}$)，调整后的波速及分段数目见表 1。

上述微分方程转化的特征线方程见式(3)、式(4)，相应的特征线网格如图 2 所示。

$$C^+: \quad H_P = C_P - BQ_P, \quad (3)$$

$$C^-: \quad H_P = C_M + BQ_P. \quad (4)$$

式中, $B = \frac{c}{gA}$; $C_P = H_A + BQ_A - RQ_A|Q_A|$; $C_M = H_B - BQ_B + RQ_B|Q_B|$; $R = \frac{f\Delta x}{2gdA^2}$ 。

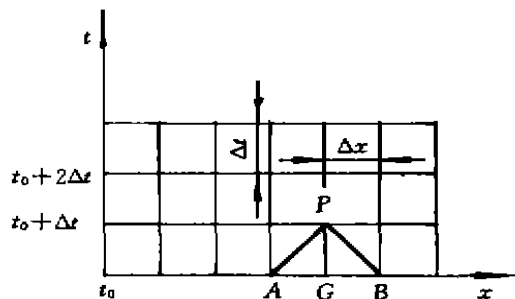


图 2 特征线网格

式(3)、式(4)是描述管道内水头 H 与流量 Q 瞬变特性的基本方程。当已知 t_0 时刻特征线网格上 A, B 两点的瞬态参数 H_A, Q_A 和 H_B, Q_B 时,借助上述特征线方程可方便地求得管道内部任一网格点 P 在 $t_0 + \Delta t$ 时刻的瞬态参数 H_P, Q_P ;特征线方程与边界条件联立,则可以求出 $t_0 + \Delta t$ 时刻边界断面上的瞬态参数。

3 边界条件

3.1 上游边界

忽略进口水头损失和流速水头,并认为前池水位保持不变时,下列条件成立:

$$H_P = H_0, \quad (5)$$

$$H_P = C_M + BQ_P. \quad (6)$$

(5),(6)式联立可求得进口断面 $t_0 + \Delta t$ 时刻的瞬态参数 $H_{P(i,1)}, Q_{P(i,1)}$, 下标 (i,j) 含意为:第1下标 i 代表管道编号,第2下标 j 代表断面编号,以下相同。

3.2 串联边界

管径或管材变化处均可看作串联边界。当忽略串联位置处流速水头的差别及水头损失时,由串联位置处的水头和流量相等及串联位置上下游正负特征线方程可解出串联边界条件:

$$H_{P(i,n+1)} = H_{P(i+1,1)} = \frac{B_{i+1}C_{P_i} + B_iC_{M_{i+1}}}{B_i + B_{i+1}}, \quad (7)$$

$$Q_{P(i,n+1)} = Q_{P(i+1,1)} = \frac{C_{P_i} - H_{P(i,n+1)}}{B_i}. \quad (8)$$

式中, n 代表第 i 条管道的分段数目。

3.3 三分岔边界

忽略分岔位置处各管流速水头的差别及水头损失时,由分岔位置处水头相等及流量满足连续性原理的已知条件,结合上下游正负特征线方程可解出三分支分岔边界条件:

$$H_{P(i,n+1)} = H_{P(i+1,1)} = H_{P(i+2,1)} = H_{P(i+3,1)} = H, \quad (9)$$

$$Q_{P(i,n+1)} = Q_{P(i+1,1)} + Q_{P(i+2,1)} + Q_{P(i+3,1)}, \quad (10)$$

$$H = \frac{B_{i+1}B_{i+2}B_{i+3}C_{P_i+1}B_i(B_{i+2}B_{i+3}C_{M_{i+1}}B_{i+1}B_{i+3}C_{M_{i+2}} + B_{i+1}B_{i+2}C_{M_{i+3}})}{B_{i+1}B_{i+2}B_{i+3} + B_i(B_{i+2}B_{i+3} + B_{i+1}B_{i+3} + B_{i+1}B_{i+2})}, \quad (11)$$

$$Q_{P(i+1,1)} = \frac{H - C_{M_{i+1}}}{B_{i+1}}, \quad (12)$$

$$Q_{P(i+2,1)} = \frac{H - C_{M_{i+2}}}{B_{i+2}}, \quad (13)$$

$$Q_{P(i+3,1)} = \frac{H - C_{M_{i+3}}}{B_{i+3}}, \quad (14)$$

$$Q_{P(i,n+1)} = \frac{C_{P_i} - H}{B_i}. \quad (15)$$

3.4 水轮机边界

水轮机边界的处理是过渡过程计算的关键,其中以利用水轮机全特性曲线的分析方法较为普遍,并为公众所接受。在此将水轮机全特性曲线^[1]离散化处理为二维数组,当已知某一瞬时导叶开度 τ 之后,通过外插法估计出时段末的转速 n'_e 及工作水头 H_e ,继而求得相应的单位转速,由 τ 及在全特性曲线上可确定该时段末的瞬态工况点,分别应用一阶和二阶 Lagrange 插值公式求出 Q'_{ie} 及 M'_{ie} ,最终求得水轮机瞬态流量 Q_P 和瞬态力矩 $M_{i+\Delta t}$:

$$Q_P = a_1 D_1^3 n'_e + a_0 D_1^2 \sqrt{H}, \quad (16)$$

式中, D_1 为转轮直径; a_0, a_1 为单位流量曲线的 Lagrange 插值系数; H 为水轮机瞬态净水头, $H = H_P - H_s + \frac{Q_P^2}{2gA^2}$; H_P 和 Q_P 为蜗壳进口瞬态测压管水头和流量, $H_P = C_P - BQ_P$; H_s 为基准面以上的尾水高度。

$$M_{t+\Delta t} = D_1^3 H M_{1c} \quad (17)$$

求出 $M_{t+\Delta t}$ 之后,可由下式求出该时段末的转速 $n_{t+\Delta t}$:

$$n_{t+\Delta t} = n_t - \frac{60(M_t + M_{t+\Delta t})\Delta t}{\pi G D^2} \quad (18)$$

式中, M 以 $N \cdot m$ 计, $G D^2$ 以 $kg \cdot m^2$ 计, n 以 r/min 计。

式(16)~(18)构成水轮机边界,必须采用迭代法进行求解,迭代过程参见文献[4]。

4 数值模型的求解及结果

根据上述数学模型,编制了相应的计算机程序。在工程布置、机组已定的条件下,对该电站三台机组同时甩全负荷导叶一段直线关闭情况下的不同调节保证措施进行了数值计算。由于蜗壳和尾水管对中高水头电站过渡过程的影响较小,计算过程中可以忽略不计^[1]。不同管径、不同关闭时间、不同 $G D^2$ 时的数值模拟结果见表 2,表 2 中序号 4 瞬态参数变化规律示于图 3。

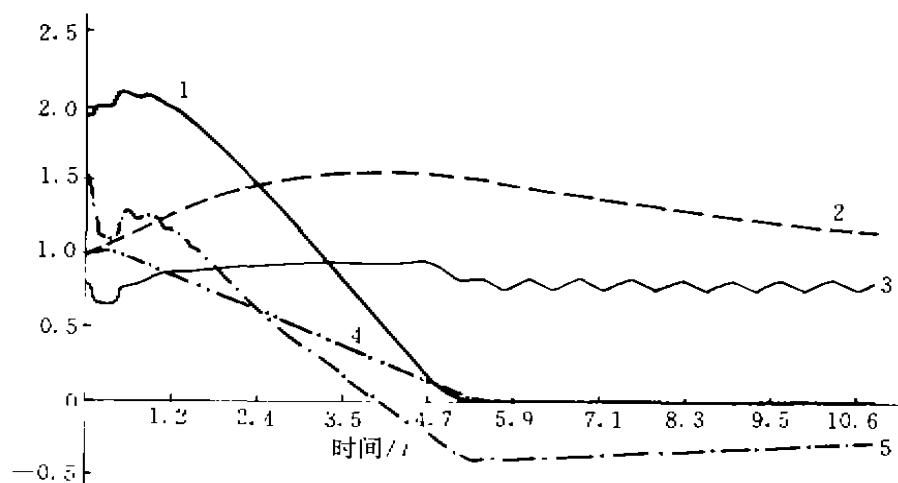


图 3 $T_s=5.0\text{ s}$ 时蜗壳进口瞬态参数变化规律

1. 流量(Q); 2. 转速(n) ($\times 1000$); 3. 水头(H) ($\times 100$); 4. 开度(τ); 5. 力矩(M) ($\times 10000$)

表 2 3 台机组同时甩全负荷导叶一段直线关闭不同情况数值计算结果

序号	管径/ m	$G D^2 /$ ($t \cdot m^2$)	关闭 时间/s	转速变化情况		水头变化情况		备 注
				最大相对 升高值 $\beta_m / \%$	发生 时间/s	最大相对 升高值 $\epsilon_m / \%$	发生 时间/s	
1	1.6	2.06	4.00	49.8	3.393	20.7	3.665	$T_c=0.3\text{ s}$
2	1.6	2.06	5.00	54.4	3.966	14.6	4.434	$T_c=0.3\text{ s}$
3	1.6	2.06	6.00	58.0	4.460	11.1	5.148	$T_c=0.3\text{ s}$
4	1.6	2.06	5.00	54.1	3.970	14.6	4.462	$T_c=0.3\text{ s}$
5	1.6	2.06	5.00	50.8	3.762	14.7	4.176	$T_c=0.0\text{ s}$
6	1.6	2.36	5.00	50.0	4.084	14.7	4.540	$T_c=0.3\text{ s}$
7	1.8	2.06	5.00	53.3	3.928	11.0	4.420	$T_c=0.3\text{ s}$
8	2.0	2.06	5.00	52.4	3.895	8.4	4.441	$T_c=0.3\text{ s}$

表2中, T_c 为导叶接力器迟滞时间, ξ 为管路系统的局部水头损失系数, 其中, 序号4, 5, 6 为计入 ξ 时的计算结果, 其余为不计 ξ 时的计算结果。从表2 可以看到, T_c 对转速的升高值的影响要比对水头升高值的影响为大(见序号4 和5); 是否考虑局部水头损失系数 ξ 则对过渡过程计算结果的影响不大(见序号2 和4); 飞轮力矩 GD^2 主要对转速的相对升高值有较大的影响(见序号4 和6), 而所有计算情况下的最大水击压力均发生在卧壳进口。

5 分析与结论

图3 反映的瞬态参数变化规律与一般混流式水轮机甩负荷规律^[1] 完全一致, 即力矩等于零时, 转速达到最大值; 而最大水头升高值出现的时间则稍滞后于最大转速升高值发生的时间。从一个方面说明了数值模型的可靠性。

从表2 可以看到, 当导叶一段直线关闭, 取 $T_s=5.0$ s, 3 台机组同时甩全负荷, 引水系统最大水击压力升高值出现在1 号和3 号机组蜗壳进口处, 且最大水头相对升高值 $\xi_{\max} < [\xi]$, 其中 $[\xi] = 30\% \sim 50\%$; 最大转速相对升高值 $\beta_{\max} < [\beta]$, 其中 $[\beta] = 55\%$ (电站并网, 且容量较小), 满足了调节保证要求, 设计和运行中可参考采用。

[参考文献]

- [1] 华东水利学院, 武汉水利电力学院, 华北水利水电学院. 水轮机调节[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [2] 常近时. 水力机械过渡过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [3] 于必录, 刘超, 杨晓东. 泵系统过渡过程分析与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [4] 何文学. 汤峪水电站大波动过渡过程数值模拟[D]. 陕西杨陵: 西北农业大学水利与建筑工程学院, 1995.

Numerical calculation of the transients with sudden load rejection in Wanniuaba Water Power Station

HE Wen-xue¹, LI Cha-qing¹, SHEN Jing-tao², FENG Jia-tao¹, YANG Jian-guo¹

(1 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Science and Technology

University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Water Resources Department of Shaanxi Province, Xi'an 710006, China)

Abstract: Based on the differential equations of the transient flow in conduit under pressure and combined with the specific boundary condition of Wanniuaba Water Power Station, a numerical model is constituted with characteristic method, which is used to simulate the transients of sudden load rejection in water power stations. It accurately simulates the transient rules of the hydraulic factors in the section of conduit under pressure and the operating parameters of the hydroelectric generating set. The reference on technology is given for the design and safe and steady operation. Moreover, the numerical model constituted in the paper will certainly have a reference value to similar water power stations.

Key words: conduit under pressure; transient flow; transients; numerical calculation