

# 带有气垫式调压室和溢流式调压井的 引水系统的水力计算

⑤  
22-25

TV732.5

黄细彬

宋永杰

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098) (青海省水电勘测设计研究院 西宁 810012)

**摘要** 介绍带有气垫式调压室和溢流式调压井的有压引水系统的数值解法。针对某一实际工程计算了调压井及气压室的水位波动、调压井溢流量、气压室的压力变化及高压管道的水击压力、讨论了气垫式调压室内的初始气体压力及体积对压力及水位波动的影响。结果表明、气压室内初始气压(或水位)的选择对系统的安全运行至关重要。

**关键词** 有压引水系统 气垫式调压室 溢流式调压井 数值计算

在高水头、长有压引水管道系统中,为了使机组负荷变化时,压力管道的内水压力上升率及机组最大转速上升率同时受到限制,设置单调压室往往是不够的,需设置双调压室。为使水电站调节保证得到满足,调压室应尽量接近厂房布置。当厂房附近的地势比较平坦时,将调压室做成一般的塔式结构是不经济的,有时甚至是不可能的。在此情况下,采用气垫式调压室(以下简称为气压室)的布置方案是较为合理的<sup>[1]</sup>。常规调压井的水力计算,一般的专业书籍均有介绍<sup>[2]</sup>,而气压室和溢流式调压井混联系统的水力计算较为复杂。本文给出了调压井、气压室及高压管道的基本方程,以及联合求解这些方程组

的数值方法;文中结合某实际工程列出了计算结果,并由计算机自动绘出水位波动过程线及有关参数,同时讨论了气压室内初始压力对管道压力和室内水位波动的影响。

## 1 基本方程

整个引水系统、调压井和气压室的布置如图1所示。系统坐标以库水位为零基准面,坐标、流量符号以箭头方向为正,根据图1可以写出下面的基本方程。

### 1.1 调压井

能量方程

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{gA_1}{L_1} (Y_1 -$$

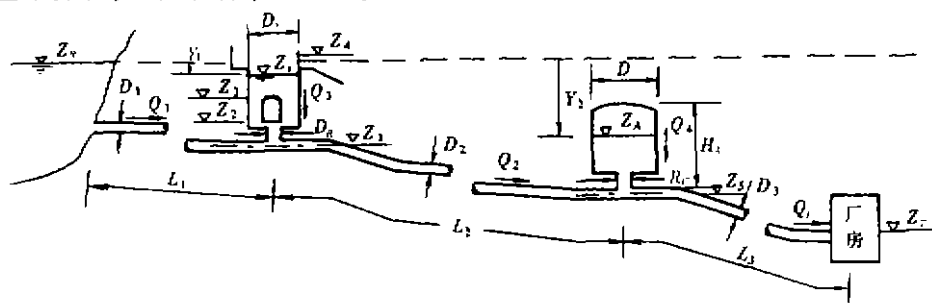


图1 引水系统布置示意图

第一作者简介:黄细彬,男,高级工程师,从事水力学及河流动力学研究,曾发表《斜面及曲面上急流的研究》等论文。

$$C_1 Q_1 |Q_1| + K' Q_3 |Q_3| \quad (1)$$

连续方程

$$\frac{dY_1}{dt} = \begin{cases} \frac{Q_3}{S} & (\text{非溢流时}) \\ \frac{Q_3 + Q_c}{S} & (\text{溢流时}) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $g$  为重力加速度;  $t$  为时间;  $L_1, A_1$  分别为水库进水口与调压井之间的引水道长度及过水面积;  $C_1$  为  $L_1$  段的总水头损失系数,

按  $C_1 = [\frac{n_1^2 L_1}{(D_1/4)^{4/3}} + \frac{R_1}{2g}] / A_1^2$  计算, 其中  $D_1$  为管径,  $n_1$  为糙率,  $R_1$  为局部损失系数;  $Q_1$  为通过引水道的流量;  $Q_3$  为通过调压井的流量;  $K'$  为调压井的阻抗系数;  $Y_1$  为库水位与调压井水位之差值;  $S$  为调压井的水平截面积,  $S = f(Y_1)$ ;  $Q_c$  为调压井的溢出流量,  $Q_c = \mu B_s (2g)^{1/2} (Z_R - Y_1 - Z_4)^{3/2}$ , 其中  $\mu$  为溢流堰流量系数,  $B_s$  为溢流堰前沿长度,  $Z_R$  为水库水位,  $Z_4$  为溢流堰顶高程。

## 1.2 气压室

能量方程

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{gA_2}{L_2} (Y_2 - Y_1 + \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p}{\rho g} - C_2 Q_2 |Q_2| + K'' Q_4 |Q_4|) \quad (3)$$

连续方程

$$\frac{dY_2}{dt} = \frac{Q_4}{A} \quad (4)$$

状态方程

$$p = p_0 (\frac{W_0}{W})^m \quad (5)$$

式中  $L_2, A_2$  分别为调压井与气压室之间的管道长度及过水面积;  $C_2$  为  $L_2$  段总水头损失系数, 按  $C_2 = [\frac{n_2^2 L_2}{(D_2/4)^{4/3}} + \frac{R_2}{2g}] / A_2^2$  计算, 其中  $n_2$  为  $L_2$  段的糙率,  $D_2$  为管径,  $R_2$  为局部损失系数;  $Q_2$  为调压井至气压室间管道的流量;  $Q_4$  为通过气压室的流量,  $Q_4 = Q_T - Q_2$ , 其中  $Q_T$  为水轮机引用流量,  $Y_2$  为库水位与气压室水位之差值;  $K''$  为气压室的阻抗系数;  $p_a$  为大气压力;  $p$  为气压室内的气体

绝对压力;  $p_0$  为气压室内的气体初始压力;  $\rho$  为水体密度;  $A$  为气压室水平截面积;  $W_0$  为气压室内初始气体体积;  $W$  为气压室的瞬时气体体积;  $m$  为多方指数, 恒温时  $m = 1$ , 绝热时  $m = 1.4$ 。

## 1.3 水击基本方程

运动方程

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (6)$$

连续方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \theta = 0 \quad (7)$$

式中  $H$  为高压管道压力水头;  $V$  为流速;  $D$  为高压管道内径;  $f$  为摩阻系数;  $c$  为水击波速;  $\theta$  为管道轴线与水平面的夹角。

## 2 基本方程的数值解法

### 2.1 水位的求解

方程(1)~(4)都是一阶常微分方程, 可用下面微分方程组表示:

$$\frac{d\xi_i}{dt} = f_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, t) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

式中  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  分别表示  $Q_1, Y_1, Q_2, Y_2$ 。

解上述方程组的方法有差分法、欧拉法和龙格-库塔法等。为了得到较高精度的解, 可采用四阶龙格-库塔法, 具体解法如下:

设  $t$  时刻变量值为  $\xi_i^{(n)}$ , 则增加一时间步长  $\Delta t$  后, 即  $t + \Delta t$  时刻, 变量值为

$$\xi_i^{(n+1)} = \xi_i^{(n)} + \frac{\Delta t}{6} (K_{i1} + 2K_{i2} + 2K_{i3} + K_{i4}) \quad (9)$$

其中

$$K_{i1} = f_i(\xi_1^{(n)}, \xi_2^{(n)}, \xi_3^{(n)}, \xi_4^{(n)}, t)$$

$$K_{i2} = f_i(\xi_1^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i1}, \xi_2^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i1},$$

$$\xi_3^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i1}, \xi_4^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i1}, t + \frac{\Delta t}{2})$$

$$K_{i3} = f_i(\xi_1^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i2}, \xi_2^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i2},$$

$$\xi_3^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i2}, \xi_4^{(n)} + \frac{\Delta t}{2} K_{i2}, t + \frac{\Delta t}{2})$$

$$K_{i4} = f_i(\xi_1^{(n)} + \Delta t K_{13}, \xi_2^{(n)} + \Delta t K_{23}, \xi_3^{(n)} + \Delta t K_{33}, \xi_4^{(n)} + \Delta t K_{43}, t + \Delta t)$$

## 2.2 水击压力的求解

将偏微分方程(6)和(7)按一定的线性组合转换成水击特征方程,根据图2网格建立差分方程,可得第*i*断面的流速和水头:

$$V_{pi} = 0.5[V_{i-1} + V_{i+1} + \frac{g}{c}(H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{f\Delta t}{2D}(V_{i-1}|V_{i-1}| + V_{i+1}|V_{i+1}|) - \frac{g}{c}\Delta t(V_{i-1} - V_{i+1})]\sin\theta \quad (10)$$

$$H_{pi} = 0.5[H_{i-1} + H_{i+1} + \frac{c}{g}(V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{c}{g}\frac{f\Delta t}{2D}(V_{i-1}|V_{i-1}| - V_{i+1}|V_{i+1}|) - \Delta t\sin\theta(V_{i-1} + V_{i+1})] \quad (11)$$

根据上述各离散格式及上下游边界条件,从初始条件开始,逐步推算,便可求出任意时刻调压井、气压室的水位及高压管道的

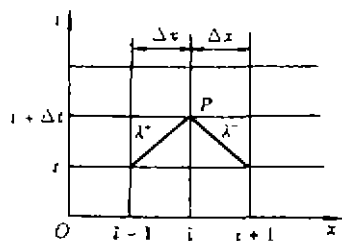


图2 特征线差分网格示意图

水击压力。若考虑机组调速器特性,则可将水轮机特性曲线离散为数组,用迭代法解水轮机结点的方程值,用龙格-库塔法解调速器微分方程组。

应该说明,当水位与水击压力联合求解时,时间步长 $\Delta t$ 应满足水击特征方程中的 $\Delta t = \Delta x/c$ 。

## 3 计算实例

某水电站引水系统如图1所示, $L_1 = 4440\text{ m}$ , $D_1 = 4.2\text{ m}$ , $n_1 = 0.014$ , $R_1 = 1.5$ ;  $L_2 = 733.8\text{ m}$ , $D_2 = 3.2\text{ m}$ , $n_2 = 0.012$ , $R_2 = 0.9$ ;  $L_3 = 1900\text{ m}$ , $D_3 = 3.2\text{ m}$ , $f = 0.0138$ ;  $c = 1000\text{ m/s}$ ; 阀门的线性启闭时间 $t = 6\text{ s}$ ; 调压井

筒径 $D_s = 6.6\text{ m}$ , 下室长度 $80\text{ m}$ , 宽度 $4\text{ m}$ , 阻抗孔口直径 $D_R = 3\text{ m}$ , 气压室筒径 $D = 10\text{ m}$ , 高度 $H_A = 12\text{ m}$ , 阻抗孔口直径 $D_F = 2.5\text{ m}$ 。引水系统的特征点高程分别为 $Z_1 = 327.66\text{ m}$ ,  $Z_2 = 331.16\text{ m}$ ,  $Z_3 = 335.73\text{ m}$ ,  $Z_4 = 341.00\text{ m}$ ,  $Z_5 = 293.80\text{ m}$ , 库水位 $Z_R = 338\text{ m}$ , 下游尾水位 $Z_T = 260\text{ m}$ ; 两台机组, 单机引用流量 $Q_T = 16\text{ m}^3/\text{s}$ 。

图3和图4分别为两种工况调压井、气压室内的水位波动过程线, 图中显示无论是调压井还是气压室, 水位波动均趋于衰减, 而且增荷时的水位波动比弃荷时衰减得快。

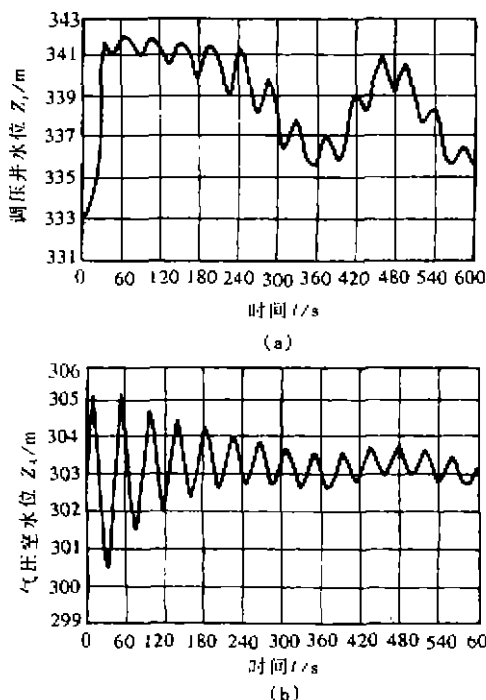


图3 两台机同时甩全负荷工况  
(a)调压井水位;(b)气压室水位

## 4 气压室内初始气压(体积)对涌浪及压力波动的影响

图5a为同一气压室内不同初始气压下, 两台机组同时丢弃负荷时, 气压室内的最高、最低水位; 图5b为气压室内最大、最小绝对气压及阻抗孔口处的最大、最小相对压力。图中显示, 最大、最小压力的差值随初始气压的增加(即初始气体体积的增加)而减小。这

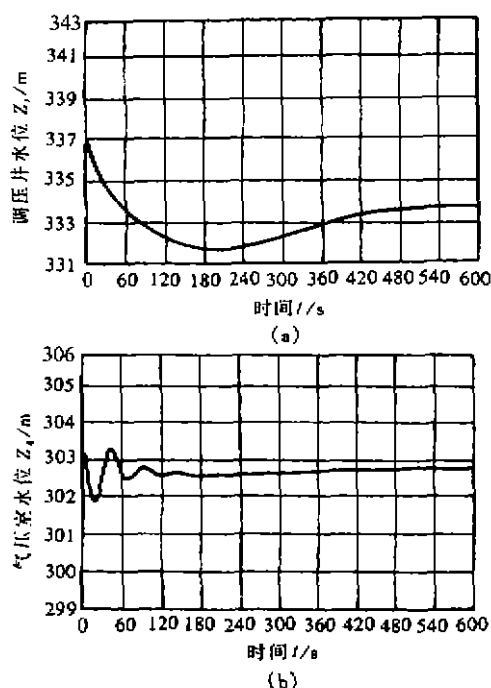


图4 一台机增至两台机工况  
(a)调压井水位;(b)气压室水位

表明同一气压室初始气压越大(即气体体积越大),负荷变化时,管道的压力波动越小。可见,气压室内初始体积较大时,对抑制管道的压力波动较有利。但另一方面,初始气压越大,气压室内水位越低,当负荷发生变化时,室内最低水位随之下降,压力管道就有进气的危险。由此说明,选择气压室的初始运行气压及水位至关重要。为了保证气压室能正常运行,调压室底部除留有1.5~2m的安全水深外,通常在最低水位到安全水深之间,还须留有一定的水体,当有少量的漏气或气体过多时,这部分水体可在短时间内起到缓解调节作用。

## 5 结 语

气压室所需的容积比等效的普通调压室容积小得多,且可靠近厂房布置,对抑制水击压力的作用是明显的,其特殊功用是一般调压室所不及的。设计调压室时,可通过计算,比较各方案的水力参数等,选择出合理的调压室体型及初始运行参数。

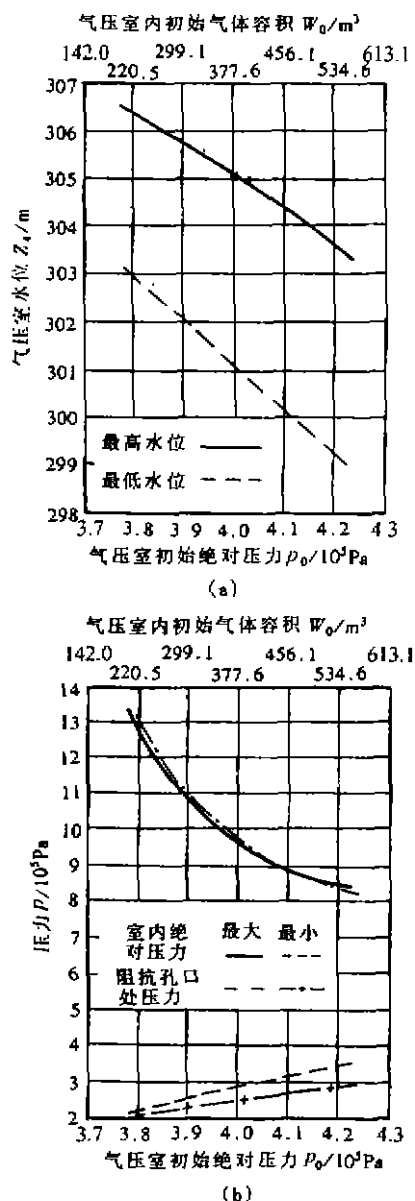


图5 气压室内初始气压及体积对室内水位及压力波动的影响  
(a)用全负荷工况气压室内最高、最低水位;(b)用全负荷工况气压室内最高、最低气体绝对压力及阻抗孔口处最大、最小压力

## 参考文献

- 1 Rathe L. An innovation in surge-chamber design. International Water Power & Dam Construction, 1975, 27 (4): 244 ~ 248
- 2 王树人主编,调压室水力计算理论与方法.北京:清华大学出版社,1975

(收稿日期:1997-03-17 编辑:许宇鹏)