

设置连通孔对差动式调压室压差和涌浪的影响

周建旭,刘德有

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 对于长引水式水电站常用的差动式调压室,分析了其兼作升管的闸门井和大井之间的胸墙在不同高程上布置的面积合理的连通孔,对调压室的差动性能和压差的影响,并结合实际算例进行涌浪分析.结果表明,在保证调压室的差动性能、涌浪幅度和衰减速度的同时,在胸墙上设置位置和尺寸合理的连通孔,可以有效降低胸墙结构承受的压差,由超过 30 m 的较大压差降低至 20 m 以下,保证调压室的安全稳定运行,且有利于闸门的控制.因此,设置连通孔的差动式调压室是合理可行的.

关键词 引水式水电站;差动式调压室;连通孔;涌浪

中图分类号:TV732.5

文献标识码:A

文章编号:1000-198X(2007)05-0587-05

差动式调压室是长引水式水电站中常用的调压室形式,主要由直径较小且带溢流堰的升管和大井组成,底部以阻抗孔口与有压隧洞连接.在过渡过程中,升管水位先于大井水位上升或下降,当其达到溢流堰后开始向大井或上室溢流,限制了水位的进一步升高,有利于机组的稳定运行.在水位变化过程中,升管和大井之间保持一水位差,直至稳定.差动式调压室综合了阻抗式调压室和溢流式调压室的优点,但结构相对复杂,特别是升管和大井紧靠布置时,两者之间的胸墙受较大的周期性水位差的作用,受力条件较差,结构设计要求较高.因此,差动式调压室的设计除了应具备良好的差动性能以外,还应充分考虑可能存在的较大结构压差,采取设置连通孔等措施来减小压差.

本文基于常用的差动式调压室水力特性的计算分析方法^[1-2],结合某水电站设计采用带连通孔的差动式调压室的实例,建立其数学模型,进一步进行涌浪分析,以研究连通孔对调压室的差动性能,以及大井和升管之间胸墙所承受压差的影响.

1 差动式调压室中设置连通孔的可行性分析

1.1 差动式调压室运行设计的关键问题

目前,我国有多座引水式常规水电站或抽水蓄能电站采用不同结构形式的差动式调压室^[3],较为普遍的结构形式采用各压力支管的检修/事故闸门井作为升管的一部分,如鲁布革水电站、太平驿水电站和天生桥二级水电站等.其中太平驿水电站和鲁布革水电站升管(包括闸门井)嵌在岩体中间,结构比较可靠;天生桥二级水电站升管(闸门井)修建在大井之内,结构较为单薄,在 1993 年进行现场甩负荷试验时,因闸门井内外水位差远远超过设计值而出现闸墩和胸墙坍塌事故^[4-5].

因此,对于差动式调压室而言,若将各压力支管的检修/事故闸门井作为升管的一部分,而升管的闸门井和大井之间的胸墙结构较为单薄,设计中应保证调压室的体型和布置满足强度和稳定性要求,特别是胸墙和调压室底板的稳定性应予以充分考虑.通常,依据胸墙和调压室底板承受的允许设计压差,以及闸门的启闭要求,在保证调压室差动性能的同时,可以选用合理的阻抗孔口尺寸以及其他体型优化措施.另外,可在胸墙的合适位置布置尺寸合理的连通孔,利用连通孔的平压作用,有效降低胸墙和调压室底板结构之间可能存在的较大压差.

1.2 设置连通孔的差动式调压室数学模型

图 1 为典型的设置连通孔的差动式调压室的平面布置图,闸门井作为升管考虑,其顶部设溢流堰,沿闸

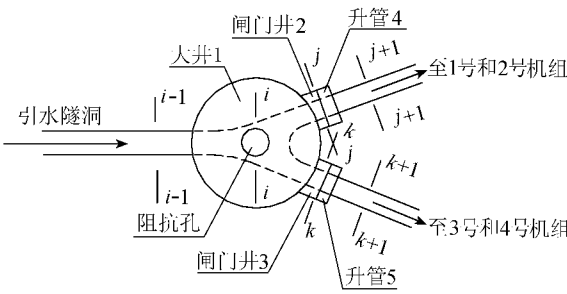


图 1 差动式调压室

Fig.1 Differential surge tank

调压室大井、各闸门井和升管的运动方程为

$$A_{S1} \frac{dZ_{PS1}}{dt} = Q_{PS1} \pm Q_{w2} \pm Q_{w3} \pm Q_{w4} \pm Q_{w5} \pm Q_{y2} \pm Q_{y3} \tag{2}$$

$$A_{S2} \frac{dZ_{PS2}}{dt} = Q_{PS2} \mp Q_{w2} \mp Q_{y2} \quad A_{S3} \frac{dZ_{PS3}}{dt} = Q_{PS3} \mp Q_{w3} \mp Q_{y3} \tag{3}$$

$$A_{S4} \frac{dZ_{PS4}}{dt} = Q_{PS4} \mp Q_{w4} \quad A_{S5} \frac{dZ_{PS5}}{dt} = Q_{PS5} \mp Q_{w5} \tag{4}$$

水头平衡条件为

$$H_{Pi} = Z_{PS1} + R_{S1} |Q_{PS1}| Q_{PS1} \tag{5}$$

$$H_{Pj} = Z_{PS2} + R_{S2} |Q_{PS2}| Q_{PS2} = Z_{PS4} + R_{S4} |Q_{PS4}| Q_{PS4} \tag{6}$$

$$H_{Pk} = Z_{PS3} + R_{S3} |Q_{PS3}| Q_{PS3} = Z_{PS5} + R_{S5} |Q_{PS5}| Q_{PS5} \tag{7}$$

i, j 和 k 节点的流量平衡条件为

$$Q_{Pi(i-1 \sim i)} = Q_{PS1} + Q_{P(i \sim j)} + Q_{P(i \sim k)} \tag{8}$$

$$Q_{P(j \sim j)} = Q_{PS2} + Q_{PS4} + Q_{P(j \sim j+1)} \tag{9}$$

$$Q_{P(k \sim k)} = Q_{PS3} + Q_{PS5} + Q_{P(k \sim k+1)} \tag{10}$$

式中： H_P, Q_P ——调压室大井或升管节点的水头和流量； 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； Z_{PS} ——调压室大井或升管水位； Q_{PS} ——流入调压室的流量，流出时为负； A_S, R_S ——调压室大井或升管面积及阻抗损失系数； Q_w ——调压室大井和升管之间的表孔溢流量； Q_y ——调压室大井和升管 2 及 3 闸门井之间的连通孔溢流量。式(8)~(10)下标中括号内为对应管段。

描述调压室大井、各闸门井和升管之间的表孔溢流方程为

$$\begin{cases} Q_{w2 \sim 5} = mB(\Delta H_{2 \sim 5})^{1.5} \\ \Delta H_{2 \sim 5} = |Z_{PS1} - Z_{PS2 \sim 5}| \text{ 或 } \Delta H_{2 \sim 5} = \max(Z_{PS1}, Z_{PS2 \sim 5}) - \nabla \end{cases} \tag{11}$$

式中： m ——升管顶部的溢流系数，本文取值为 1.75 ~ 1.85； B, ∇ ——溢流前缘有效宽度和堰顶高程； $\Delta H_{2 \sim 5}$ ——大井、各闸门井和升管之间的水位差或堰上水头。

描述调压室大井和闸门井 2 和 3 之间连通孔的溢流方程^[6]为

$$\begin{cases} Q_{y2 \sim 3} = \sum \mu_1 A_1 (2g\Delta H_{2 \sim 3}^{0.5}) + \sum \mu_2 A_2 (2g\Delta H'_{2 \sim 3})^{0.5} \\ \Delta H_{2 \sim 3} = |Z_{PS1} - Z_{PS2 \sim 3}| \quad \Delta H'_{2 \sim 3} = \max(Z_{PS1}, Z_{PS2 \sim 3}) - \nabla_i \end{cases} \tag{12}$$

式中： μ_1, A_1 ——连通孔淹没出流的流量系数和相应的连通孔面积，参考深孔溢流特性，本文 μ_1 取为 0.75； μ_2, A_2 ——连通孔自由出流的流量系数和相应的连通孔面积， μ_2 可取为与 μ_1 相等； ∇_i ——发生自由出流时各连通孔中心高程。

联立求解调压室大井和升管的控制方程并考虑溢流关系，通过化简可得到包含溢流关系的非线性微分方程，状态量为调压室大井和各升管的瞬时水位，采用龙格-库塔法求解。结合有压输水系统的特征线法^[7-8]以及机组运动方程^[9]即可进行设置连通孔差动式调压室的涌浪分析。

1.3 连通孔的水力影响分析和设置要求

对于差动式调压室，在大井与闸门井之间的胸墙上设置连通孔，由于调压室大井和闸门井水位在涌浪过

门井不同深度布置与大井相通的连通孔。

因升管紧靠着闸门井，可合并为一个节点。设调压室大井节点和各升管节点分别为 i (调压室大井 1)、 j (闸门井 2 和升管 4) 和 k (闸门井 3 和升管 5)，则控制方程包括 $i-1 \sim i, i \sim j$ 和 $i \sim k$ 3 个管段的正特征线方程，以及 $i \sim j, i \sim k, j \sim j+1$ 和 $k \sim k+1$ 4 个管段的负特征线方程，统一描述为

$$C^+ : H_P = C_P - B_P Q_P \quad C^- : H_P = C_m + B_m Q_m \tag{1}$$

程中存在较大的水位差,当水位超过连通孔的设置高程以后,即发生孔口溢流,可减缓升管(包括闸门井)内水位上升或下降的速度,在一定程度上限制了水位差的进一步增大,即有效降低了大井与闸门井之间胸墙承受的实际压差。

考虑设置连通孔的差动式调压室,在调压室大井水位上升过程中,因孔口溢流减缓了升管(包括闸门井)内水位上升的速度,同时由于大井的面积相对较大,水位上升的速度略有提高,因此,设置连通孔会降低升管(包括闸门井)内的最高涌浪水位,但会抬高大井的最高涌浪水位,使调压室的差动性能变差,进而可能影响涌浪的衰减速度。在调压室大井水位下降过程中,因孔口溢流减缓了升管(包括闸门井)内水位下降的速度,而大井水位下降的速度略有提高,因此,设置连通孔会降低大井的最低涌浪水位。

差动式调压室设计要求升管在最初时段即达到极值。在升管停止溢流前,大井水位要求达到升管顶部,同时宜使大井和升管具有相同的最高和最低涌浪水位,以充分体现其差动作用并发挥大井的作用,并有利于调压室水位的迅速稳定,保证机组的稳定运行^[3,10]。因此,对于设置连通孔的差动式调压室,要求连通孔的设计和布置要满足减小大井和闸门井之间胸墙和调压室底板压差的要求,在有效改善调压室结构受力条件的同时,应保证具有良好的差动性能,同时大井和升管的最低涌浪水位也应满足布置要求。

由于水电站水力—机械过渡过程的多样性和复杂性,差动式调压室的涌浪过程也较为复杂,因此,连通孔一般布置在大井与闸门井之间的胸墙上沿高度方向的等距位置,其布置间距的大小(即连通孔的个数)和每个连通孔的面积应视涌浪分析和相应的设计标准而定,主要考虑差动效果、闸门井的胸墙可承受的允许压差和最低涌浪水位的控制标准等多方面的因素。

2 连通孔对差动式调压室水力特性影响的算例分析

如图 2 所示,某水电站设计采用带连通孔的差动式调压室(平面布置如图 1 所示),在兼作升管的闸门井和大井之间胸墙的不同高程上布置 8 个初拟直径为 0.75 m 的连通孔,高差为 9.0 m,以在满足差动式调压室设计要求的前提下,有效降低胸墙结构存在的较大压差。结合该水电站实例,以及相应的设置连通孔差动式调压室的数学模型,进行差动式调压室的涌浪分析。

2.1 对调压室涌浪和结构承受压差的影响

为了分析设置连通孔对调压室差动性能,以及大井和升管之间胸墙所承受压差的影响,分别考虑 3 个连通孔方案(直径分别为 0.5 m、0.75 m 和 1.0 m)和不设连通孔方案,进行大波动过渡过程计算和涌浪分析。计算控制工况包括:工况 1,水库水位为正常蓄水位,尾水位对应 4 台机组正常运行水位,4 机组同时甩荷;工况 2,水库和尾水位均对应校核水位,1 号~3 号机组运行,4 号机组增荷,当进入调压室的流量达最大时,4 台机组同时甩全荷。计算及分析结果见表 1。表 1 中作用于调压室底板的最大压差 ΔH_{is} ,向上为正,作用于大井和升管(闸门井)之间胸墙上的最大压差 ΔH_{zs} ,指向大井为正。图 3 为工况 1 不设或设 0.75 m 连通孔方案调压室大井和升管的涌浪过程线。

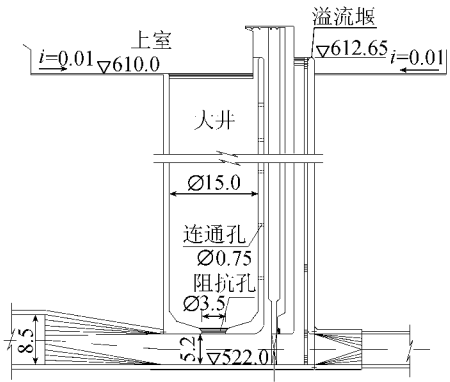


图 2 设置连通孔的差动式调压室剖面(单位:m)

Fig.2 Cross-section of differential surge tank with interconnecting holes(unit :m)

表 1 连通孔的影响分析							
Table 1 Effect analysis of interconnecting holes							
计算 工况	连通孔 直径/m	大井最高 涌浪水位/m	升管最高 涌浪水位/m	大井最低 涌浪水位/m	升管最低 涌浪水位/m	底板最大压差 ΔH_{is} /m	胸墙最大压差 ΔH_{zs} /m
1	0	612.29	614.47	548.74	548.71	32.34	31.89
	0.50	612.38	614.44	545.97	545.95	24.55	23.46
	0.75	612.50	614.31	542.29	542.28	16.30	14.09
	1.00	612.58	614.26	541.45	541.44	14.74	12.20
2	0	613.70	614.78	559.80	559.78	32.65	31.89
	0.75	613.93	614.60	552.04	552.02	17.73	15.03

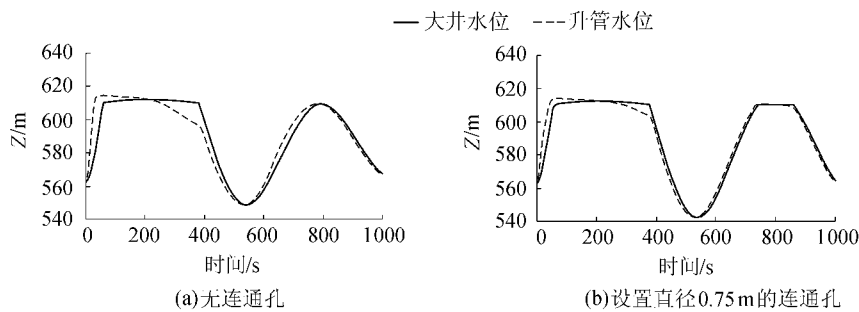


图 3 工况 1 差动式调压室大井和升管的涌浪过程线

Fig.3 Surge variation in outer chamber and riser of differential surge tank in case 1 in short period

分析表 1 和图 3 可知：

a. 大井与闸门井之间设置连通孔，随着连通孔直径的增大，大井最高涌浪上升，由于上室的作用，变化幅度很小，而大井最低涌浪下降，升管最高涌浪和最低涌浪均下降，与理论分析一致。

b. 若大井与闸门井之间不设置连通孔，作用于调压室底板最大压差 ΔH_{ts} 和作用于调压室大井和升管（闸门井）之间胸墙上的最大压差 ΔH_{zs} 明显较大，超过 30.0 m，对调压室结构强度和稳定性不利。若合理设置直径为 0.75 m 的连通孔，则两项压差均小于 20.0 m，有利于保证胸墙的结构可靠性和调压室的安全运行。

c. 在闸门井的胸墙上设置直径为 0.75 m 的连通孔，升管亦能在最初时段即达到极值，对应时刻约为 70.0 s，稍滞后于不设置连通孔时升管水位达到极值对应的时刻 61.0 s，表明设置连通孔后对差动效果有一定程度的影响。

2.2 对调压室涌浪衰减速度的影响

图 4 为设置 0.75 m 连通孔和不设置连通孔时工况 1 大井水位的涌浪衰减过程线。由图 4 得出调压室大井涌浪过程线动态特性分析结果，见表 2。

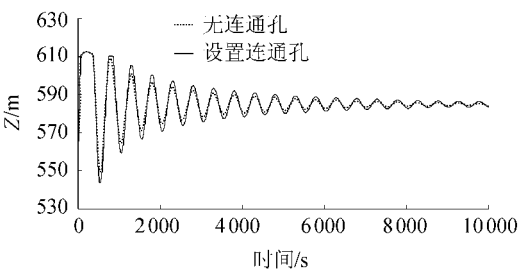


图 4 工况 1 调压室大井涌浪过程线

Fig.4 Surge variation in outer chamber of differential surge tank in case 1 in long period

表 2 调压室大井涌浪的动态特性分析结果

Table 2 Dynamic characteristic analysis of surges in outer chamber of surge tank					
波动周期	连通孔直径/m	最高涌浪高程/m	最低涌浪高程/m	波动幅度/m	衰减幅度/m
1	0	612.29	548.74	63.55	
	0.75	612.50	542.29	70.21	
2	0	609.05	564.66	44.39	19.16
	0.75	610.23	557.74	52.49	17.72
3	0	600.98	570.80	30.18	14.21
	0.75	606.06	565.21	40.85	11.64

由图 4 和表 2 可以看出：在闸门井胸墙上设置连通孔后，虽然调压室大井水位各波动周期对应时段的最 高涌浪、最低涌浪和涌浪幅度增大，但衰减幅度变化较小，相应的涌浪过程线与不设置连通孔时涌浪过程线 的衰减趋势基本一致，衰减过程约滞后 1 个周期。因此，设置连通孔对调压室涌浪的衰减速度和稳定时间影 响较小。

3 结 论

对于闸门井兼作升管的差动式调压室设计而言，保证闸门井胸墙的结构可靠性是调压室安全稳定运行 的关键因素。若在闸门井胸墙上沿高度方向合适位置设置合理直径的连通孔，在保证对调压室的差动性能、 涌浪的衰减速度和对稳定时间影响较小的前提下，可以有效降低闸门井胸墙和调压室底板承受的压差，改善 调压室的结构受力条件，满足调压室结构强度和可靠性要求，确保差动式调压室安全稳定运行，且有利于闸 门的启闭，即在一定条件下差动式调压室设置连通孔是可行的。

参考文献：

[1] 王念慎 , 郑大琼 , 范雨臣 . 长引水隧洞水电站差动式调压井最不利工况研究 [J]. 水利学报 , 1995 , 26 (6) : 23-30 .
[2] 鞠小明 , 陈家远 . 阻抗差动式调压室的水力计算研究 [J]. 水力发电学报 , 1996 , 15 (4) : 54-90 .
[3] 张志昌 , 刘松舰 , 刘亚菲 . 差动式调压室甩负荷时水位波动以及大井面积和有效阻抗孔面积的计算方法 [J]. 水动力学研究与进展 : A 辑 , 2006 , 21 (3) : 402-410 .
[4] 廖灿戊 , 张津生 . 天生桥二级水电站调压井闸门井胸墙闸墩倒塌事故分析 [J]. 水力发电 , 1994 , 20 (10) : 24-27 .
[5] 常近时 , 白朝平 , 寿梅华 . 天生桥二级水电站水轮机装置甩负荷过渡过程的动态特性 [J]. 水力发电 , 1995 , 21 (7) : 36-38 , 59 .
[6] 左东启 , 顾兆勋 , 王文修 . 水工设计手册 : 基础理论 [K]. 北京 : 水利电力出版社 , 1983 : 361-366 .
[7] 周建旭 , 张健 , 刘德有 . 双机共变顶高尾水洞系统水力干扰分析 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2004 , 32 (6) : 661-664 .
[8] WYLIE E B , STREETER V L , SUO Li-sheng . Fluid transients in system [M]. NJ : Prentice Hall , Englewood Cliffs , 1993 : 37-79 .
[9] 孙美凤 , 沈祖诒 , 吴海波 . 引水式电站并列运行机组的 MATLAB 仿真模型 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2003 , 31 (3) : 268-271 .
[10] 中华人民共和国电力工业部 . DL/T 5058—1996 水电站调压室设计规范 [S]. 北京 : 中国电力出版社 , 1997 .

Differential pressure and surge analysis of differential surge tank with interconnecting holes

ZHOU Jian-xu , LIU De-you

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

Abstract :Based on the differential surge tank commonly used in long-distance diversion hydropower stations , in which interconnecting holes with rational cross sectional area were arranged at different elevations of breast wall between outer chamber and gate shaft used as a riser , a study was made on the influences of interconnecting holes on the differential performance and differential pressure of the surge tank , and further surge analysis was performed through a case study . The result shows that , with less effect on differential performance , surge amplitude , and decay rate of the surge tank , the arrangement of interconnecting holes at rational positions with proper sizes can effectively decrease the differential pressure on breast wall (from over 30 m down to 20 m below) and ensure the safe operation of the surge tank , and it is beneficial to gate control . Therefore , the differential surge tank with interconnecting holes arranged is rational and feasible .

Key words :diversion type hydropower station ; differential surge tank ; interconnecting hole ; surge analysis