

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.03.043

露天上室式调压井在引水式电站中的设计研究

洪振国, 王 鹏

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘 要: 对于中低水头长距离引水隧洞的电站, 当调压井附近没有可利用的地质探洞、交通洞等加以改造作为调压井的上室时, 采用洞室型式上室工程量大, 不宜选用常规上室为洞室式的调压井。在上室达不到成洞条件, 调压井处地形平缓, 地质较好时, 可采用露天上室式调压井。因露天上室式调压井具有限制水位继续上升, 弃水储存功能, 运行水锤压力小, 运行安全, 施工安全、滑模施工方便的优点, 是调压井优先选用的型式。通过简单圆筒式、阻抗孔式、露天上室式三种型式的调压井比选, 结果表明: 在调压井高度较小, 工程量较少, 投资量较少, 选用露天上室式更合理。

关键词: 水电站; 调压井; 露天上室式

中图分类号: TV732+.51

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)03-0194-05

Research on Design of Open-air Upper-chamber-type Surge Shaft in Diversion-typed Power Station

HONG Zhen-guo, WANG Peng

(Yunnan Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: For the power station with medium-low water head and long-distance diversion tunnel, and when there are no available geologic exploration tunnel and transport hole to be reformed near the surge shaft, the engineering quantity is large when using cavern-typed upper-chamber for the surge shaft, so it is not suitable to use the conventional upper-chamber as the cavern-typed surge shaft. When the upper-chamber could not reach the hole condition, and the surge shaft is located in the conditions of gentle topography and good geology, the open-air upper-chamber-typed surge shaft could be used. The open-air upper-chamber-typed surge shaft has such advantages as limiting water level rise, storing waste water. Also, it needs small water hammer pressure to operate safely and it could be constructed safely. Furthermore it is suitable for slip-form construction. Therefore it is a prior-selecting type of the surge shaft. Through the comparison and selection for three types of the surge-shaft such as the simple cylindrical type, impeded-hole type and open-air upper-chamber type, it is shown that the open-air upper-chamber-typed surge shaft is more rational because of its smaller height, less engineering quantity and less investment expenses.

Keywords: hydropower station; surge shaft; open-air upper-chamber type

引水式水电站中的调压井是由调压井自由水面反射水击波, 限制水击波进入压力引水道, 以满足机组调节保证的技术要求, 改善机组在负荷变化时的运行条件及供电质量, 改善压力输水道的压力状态^[1]。在水电站工程调压井设计时, 对于长距离引水隧洞及低中水头的水电站, 调压井处地形平缓, 地质较好时, 可以采用露天上室式调压井。露天上室

式调压井由露天上室、井筒、快速事故闸门及其启闭室组成, 其中露天上室由明渠、露天水池组成, 结合了简单圆筒式和常规上室为洞室式的调压井的优点, 调压井结构简单, 运行水锤压力小, 运行安全, 施工安全、滑模施工方便, 反射水锤波效果最好。当丢弃负荷时, 调压井的水位迅速上升, 水位上升至露天上室后, 上室供丢弃负荷时储水之用^[2], 同时有效地

限制最高水位,缩小了水面波动的幅度^[3],使调压井高度降低,有工程量减少,投资量小的优点,因此,有必要进行露天上室式调压井结构研究^[4-16]。

以油房沟电站的露天上室式调压布置及结构设计为例,通过简单圆筒式、阻抗式、露天上室式三种型式的调压井比选研究,进行调压井水力学计算,选定露天上室式调压井方案是合理的。

1 工程概况

油房沟电站为引水式电站,混凝土拦河闸坝坝高23.2 m,总库容40万m³,电站装机容量6 MkW,额定水头162 m,引水流量44 m³/s。工程规模为中型,拦河闸坝、取水口、引水隧洞、调压井、压力钢管道、厂房及升压站等永久性主要建筑物按3级设计,次要建筑物按4级设计,临时性的建筑物按5级设计。

油房沟电站为引水式电站,油房沟电站由拦河闸坝、取水口、电引水隧洞、调压井、压力管道、厂房、开关站组成。

拦河闸坝为混凝土闸坝,坝顶轴线长78 m,坝高23.2 m 主要由泄洪、冲沙及溢流堰等建筑物组成。

取水口布置于大坝上游左岸,采用侧向取水,结构为塔式进水口,由拦沙墙、冲沙道、拦污栅及闸室等建筑物组成,冲沙道与大坝泄洪冲沙底孔相连,取水塔闸室经渐变段与有压引水隧洞相接。

引水隧洞前段3200 m 布置于左岸,经跨河桥进入右岸,隧洞总长9 951 m,为有压圆形隧洞,隧洞出口接调压井,全线设有7个转弯。

调压井为带上室的简单圆筒式,井筒高约63 m,上室为露天水池,井筒内设有快速事故闸门。调压井通过渐变段与压力管道联接。

压力管道上接调压井,下连电站厂房主阀,全线地下埋管布置,包括二段平管、一段斜管,主管总长425 m,采用一管双机的供水方式。

厂区位于洒渔河与油房沟交汇处的右岸河滩上,距大坝约10 km(直线距离)。包括主厂房、副厂房及开关站,为引水式地面厂房,机组安装高程712.95 m。水电站枢纽布置简图见图1。

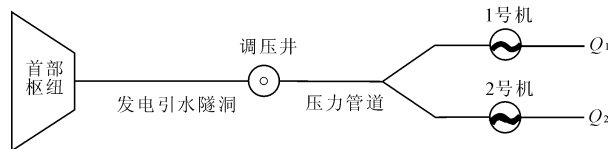


图1 水电站枢纽布置简图

2 调压井布置

调压井位置宜靠近厂房,并结合地形、地质、压力水道布置等因素进行技术经济分析比较后确定^[1]。结合本工程选址及厂区枢纽总布置,调压室位置只能选择位于渔堡东侧平缓岸坡中,山坡高程915 m~950 m。地形为三角形缓坡,总体地形坡度15°,无大的不良物理地质现象,整个岸坡为一浅层崩坡积体,厚度6.5 m,下伏基岩灰岩。由于调压井上室达不到成洞条件,调压井处地形平缓,地质较好时,采用露天上室式调压井,露天上室式调压井具有限制水位继续上升,弃水储存功能^[2],运行水锤压力小,运行安全,施工安全、滑模施工方便的优点,所以油房沟水电站调压井选用露天上室式调压井。

3 调压井结构设计

油房沟电站的调压井采用露天上室式,由井筒、露天上室、快速事故闸门室及其启闭室组成,其中露天上室由明渠、露天水池组成,各部分结构均采用钢筋混凝土结构。

调压井上游接引水隧洞,调压井底板高程为隧洞出口底板高程,调压井底板高程859.00 m,井顶高程921.70 m,井筒高62.7 m。井筒为半圆形断面,净半径 $r = 3.8$ m,井壁衬砌厚0.6 m~1 m。下游跟快速事故闸门井连成一体,快速事故闸门井也是半圆形断面,上游井筒与事故闸门井组成一个完整封闭的圆形断面^[5]。闸门采用下游止水,闸门尺寸为3.2 m×3.2 m,闸门后面设两根直径1 m的圆形通气孔,调压井后通过渐变段与内径为3.2 m的高压管道相连。在井筒顶部设启闭机室,启闭机平台高程930.70 m。

上室为矩形露天水池,尺寸(长×宽×高)为35 m×58 m×5 m,通过一条(长×宽×高)22.3 m×8.4 m×5 m的明渠与调压井井筒相连,池底板高程921.70 m,以1%底坡降至井筒。

4 调压井水力学计算

油房沟电站为引水隧洞洞线较长、中低水头的电站,下面根据《水电站调压室设计规范》^[1]及《水工设计手册7》^[2](水电站建筑物)对露天上室式调压井进行水力学计算。

4.1 设置调压井的必要性计算

根据设置调压井的条件公式^[1]:

$$T_w > [T_w]$$

$$T_w = \frac{\sum L_i v_i}{g H_p} \quad (1)$$

式中: T_w 为压力水道水流惯性时间常数(s); v_i 为各管段内相应的平均流速(m/s); L_i 为上游压力水道、尾水管、尾水管延伸及蜗壳段各段的长度(m); g 为重力加速度(m/s²); H_p 为设计水头(m); $[T_w]$ 为 T_w 的允许值, 一般取 2 s ~ 4 s。 $[T_w]$ 的取值与电站水头有关, 对于低水头水电站可取大值; 对于高水头水电站宜用小值^[1]。

由于油房沟电站引水隧洞总长 9 951 m, 洞径为 4.531 m, 满负荷运行时引水流量 44 m³/s, 最小净水头 201.05 m, 压力管道长 456 m, 管径 3.2 m, 经过水力学计算, 水流惯性时间 T_w 值($\sum L_i v_i / g H_p$) 为 7.4 s > 3.5 s, 特性计算值大, 为了限制水击波进入压力引水道, 减少高压管道中的水击压力, 限制水击波进入压力引水隧洞, 以满足机组调节保证的技术要求, 改善机组在负荷变化时的运行条件及供电质量^[1], 因此在高压管道与引水隧洞末端连接处应设置调压井。

4.2 调压井稳定断面计算

在水电站运行负荷变化时, 为了满足调压井水位波动的稳定性, 根据《水电站调压室设计规范》^[1] 计算调压室的稳定断面:

$$F = K F_{Th} = K \frac{L f}{2g(\alpha + \frac{1}{2g})(H_0 - h_{w0} - 3h_{wm})} \quad (2)$$

式中: F_{Th} 为托马临界稳定断面面积(m²); f 为压力引水段断面面积(m²); L 为压力引水段(自水库到调压室)长度(m); H_0 为发电最小毛水头(m); α 为水库至调压室水头损失系数, $\alpha = h_{w0}/v^2$ (包括局部水头损失与沿程水头损失)(s²/m), 在无连接管时用 α 代替($\alpha + l/2g$); H_0 为发电最小静水头(m); v 为压力引水段平均流速(m/s); h_{wm} 为压力管道水头损失(m); h_{w0} 为压力引水段水头损失(m); K 为系数, 一般可采 1.0 ~ 1.1, 选用 $K < 1.0$ 时应有可靠的论证^[1]。

由于油房沟电站引水隧洞总长 9 951 m, 洞径为 4.531 m, 压力隧洞最大水头损失 38.087 m, 隧洞最小水头损失 18.158 m, 压力管道水头损失 6 m, 根据上式调压井托马临界稳定断面计算面积得 15.4 m², 为了限制水位波动高度, 实际调压井断面面积取 33.71 m², 这也从另一个侧面说明了油房沟水电站采用露天上室式调压井是合理的。

4.3 调压室最低涌波水位计算

最低涌波水位计算时, 取水库最低发电水位, 电

站机组由 $n - 1$ 台增至 n 台, 或由 2/3 负荷突增至全负荷^[1]。

露天上室式调压井增加负荷时, 根据《水工设计手册 7》^[2] 最低涌波计算为:

$$\frac{z_{\min}}{h_{w0}} = 1 + (\sqrt{\epsilon - 0.275 \sqrt{m}} + \frac{0.05}{\epsilon} - 0.9)(1 - m)(1 - \frac{m}{\epsilon^{0.62}}) \quad (3)$$

式中: $\epsilon = \frac{L f v_0^2}{2g F_s h_{w0}^2}$, ϵ 为无因次系数, 表示压力引水道—调压井系统的特性; z_{\min} 为调压井最低下降水位(m); $m = \frac{Q}{Q_0}$, Q_0 为增加负荷后引水段中的流量(m³/s); Q 为增加负荷前引水段中的流量(m³/s)^[2]。

对于露天上室式调压井, 需要复核丢弃全负荷第二振幅计算, 丢弃负荷时后半幅的最大水位下降值 z_2 可由式(4) 计算^[2]:

$$x_{\max} + \ln(1 - x_{\max}) = \ln(1 - x_2) + x_2 \quad (4)$$

由于水库发电死水位 914.00 m, 发电引水隧洞总长 9 951 m, 最大引水流量 44 m³/s, 隧洞断面面积为 16.12 m², 隧洞流速 2.729 m/s, 压力隧洞最大水头损失 38.087 m, 隧洞最小水头损失 18.158 m, 调压井断面面积 33.71 m² 经最低涌波水位的公式计算, 一台机组满负荷运行, 第二台机组从空转突增到满负荷时, 最低涌波 46.753 m, 当全部机组瞬时丢弃全负荷时, 根据计算, 第二振幅为 27.861, 最低涌波水位 867.25 m, 则调压室最低涌波水位与调压井处压力引水段顶部之间的安全高度满足了《水电站调压室设计规范》应不小于 2 m ~ 3 m 的要求。

4.4 调压井最高涌波水位及上室容积公式

露天上室式调压井丢弃全负荷时的最高涌波及上室容积由式(5) 计算^[2]:

$$e^{\frac{2(x_{\max} - x_c)}{\epsilon_c}} = \frac{1 + \frac{2x_{\max}}{\epsilon_c}}{1 - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \left[1 - e^{\frac{2(x_c - 1)}{\epsilon_s}} \right]} \quad (5)$$

式中: $x_c = \frac{z_c}{h_{w0}}$; $\epsilon_s = \frac{L f v_0^2}{2g F_s h_{w0}^2}$; $\epsilon_c = \frac{L f v_0^2}{2g F_c h_{w0}^2}$; z_c 为自上游库水位至上室底面的距离(m); F_s 为竖井的断面面积(m²); F_c 为上室断面面积(m²); v_0 为正常运行流速(m/s)。

如果上室底部与上游最高静水位在同一高程, 或不计竖井面积时, 可按式(6) 近似地计算上室的容积 W_B :

$$W_B = \frac{Lfv_0^2}{2gh_{w0}} \ln\left(1 - \frac{h_{w0}}{z_{\max}}\right) \quad (6)$$

由于上室底部与水库校核洪水位在同一高程为 921.70 m,明渠断面面积为 36 m²,二台机组同甩满负荷时,根据上述调压井上室公式计算,调压井最高水位波动幅值 4.2 m,最高涌浪水位为 925.9 m。上室容积按丢弃负荷时的涌水量确定,上室容积为 5 624 m³,调压井安全超高满足了《水电站调压室设计规范》最高涌波水位以上不宜小于 1.0 m 的要求,因此调压井设计高度是合适的。

5 调压井方案比选

差动式调压室施工难度大,结构较复杂,对于长距离引水隧洞较大流量、低中水头的水电站,一般不选取差动式调压井。油房沟电站调压井附近没有冲沟,泄水无法解决,不宜选取溢流式调压井^[4]。根据调压井的水力特征、结构布置、地形地质条件及方便施工,对带闸门三种调压井型式分别进行了水力计算,三种调压井型式分别为简单圆筒式、阻抗式、露天上室式,三种调压井型式调压井具体特性见表 1。

表 1 调压井特性表

项目	简单圆筒式	阻抗式	露天上室式
闸门井面积/m ²	8.96	8.96	8.96
稳定断面/m ²	33.71	33.71	33.71
最高涌波水位/m	970.46	944.90	925.9
最低涌波水位/m	867.25	874.14	867.25
井顶高程/m	971.46	945.90	926.90
井底高程/m	859.00	865.89	859.00
上室容积/m ³	—	—	5624
阻抗孔径/m	—	1.51	—

由表 1 可知:简单圆筒式调压井水位波动范围 867.25 m~970.46 m、水位差 103.21 m,阻抗式调压井水位波动范围 874.14 m~944.90 m、水位差 70.76 m;露天上室式调压井水位波动范围 867.25 m~926.90 m、水位差 59.65 m,三种调压井开挖洞径相同,露天上室式调压井比简单圆筒式调压井理论计算高度低了 43.56 m,露天上室式调压井比阻抗式调压井理论计算高度低了 11.11 m。

根据调压井结构布置,调压井处地面高程为 923 m,简单圆筒式调压井井顶比地面高 48.46 m,阻抗式调压井井顶比地面高 22.9 m。露天上室式调压井井顶比地面仅高 3.9 m。在三种型式中,简单圆筒式及阻抗式调压井井顶距地面较高,到调压井

闸门的检修平台交通不易解决,为了保证调压井及下游厂房运行安全,需对调压井结构加强处理,所需的工程量大,所以选用露天上室式调压井是合理的。

油房沟电站调压井,如果采用带阻抗孔露天上室式调压井,闸门井兼作阻抗孔,由于闸门井断面面积 8.96 m²,引水隧洞断面面积 16.12 m²,闸门井面积(阻抗孔面积)为压力引水隧洞面积的 56%,不满足《水电站调压室设计规范》阻抗孔面积为压力引水道断面的 25%~45% 的要求,不宜采用带阻抗孔露天上室式调压井^[5]。

从地形地质条件上看,调压井处地形平缓,坡度仅 12°,第四系覆盖层浅,厚仅 6.5 m,上室布置具备较好的地形地质条件;从井筒高度上看,上室的设置可有效的减小井筒高度,限制调压室内水面振荡的幅度,井筒高度是三种型式中最底的;从工程量上看,设上室的简单圆筒式调压井,上室工程量增加不大;从运行上看,圆筒式的调节作用较阻抗式好,水锤压力较阻抗式小;从施工上看,圆筒式井壁衬砌有利于滑模施工,施工方便,因此调压井型式选用露天上室式是合理的。

6 结 语

在水电站工程的调压井设计时,当调压井处地形平缓,覆盖层浅,选取露天上室式调压井,限制调压井内水面振荡的幅度,可有效的减小井筒高度,在同等条件下露天上室式比阻抗孔式及简单圆筒式调压井高度小,同时工程投资较少,运行安全,施工安全、滑模施工方便的优点,优先选用露天上室式调压井。对于长距离引水隧洞、中低水头电站,对调压井结构布置设计时,根据地形、地质、压力水道布置等因素进行技术经济比较后确定。选取调压井结构布置合理,施工条件较好,结构尽量简单、工期较短、工程投资少、方便管理及运行安全的调压井型式。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国电力工业部. DL/T5058-1996. 水电站调压室设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [2] 华东水利学院. 水工设计手册(第七卷)——水电站建筑物[M]. 北京:水利电力出版社,1989.
- [3] 潘家铮. 水工隧洞和调压室(调压室部分)[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [4] 洪振国. 水电站调压井形式比选研究[J]. 中国农村水利水电,2013,(4):113-115,117.
- [5] 洪振国. 六郎洞电站溢流式调压井型式比选研究[J].

中国农村水利水电, 2013, (2): 129-133.

- [6] 洪振国. 水电站调压井方案比选研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 157-161.
- [7] 黄智刚. 中低水头电站调压井方案比选[J]. 中国农村水利水电, 2008, (5): 131-132, 135.
- [8] 李洪春, 纪福春. 组合式调压井在漾洱水电站工程设计中的应用[J]. 水利规划与设计, 2008, (5): 65-66.
- [9] 张泽辉, 娄绍撑, 余学彦. 白水江三级水电站山体内双室溢流式调压井布置特点[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 30-32.
- [10] 谭新莉, 柳 辉. J2 水电站调压井设计探讨[J]. 东北水利水电, 2011, (10): 13-14, 26.
- [11] 刘海峰, 张红梅. 吉沙水电站引水调压井设计[J]. 水

力发电, 2012, 38(3): 54-57

- [12] 苏 岩, 刘国栋, 张大成. 天花板水电站调压井稳定断面分析及优化研究[J]. 水力发电, 2011, 37(6): 13-16.
- [13] 古丽萍. 郑旗水电站调压井水力计算[J]. 科技信息, 2009, (27): 315, 331.
- [14] 黄邵军. 越南拉显水电站调压井设计方案的优化[J]. 浙江水利科技, 2011, (177): 37-38.
- [15] 张晓宏, 李建中. 调压井断面尺寸变化对水锤压力反射及质量波动衰减速度的影响[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1): 63-65.
- [16] 杨 嵘, 曹渝波, 马敏艳. 瑞丽江一级水电站调压井设计[J]. 云南水力发电, 2008, 24(5): 37-39.

(上接第 184 页)

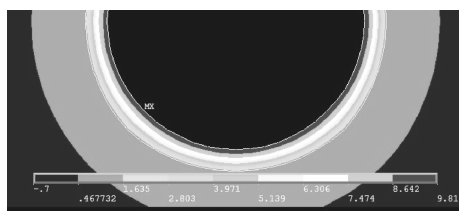


图 8 保温层设置在衬砌里侧(放大图)

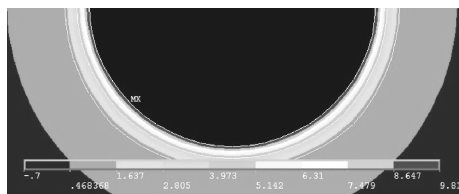


图 9 保温层设置在衬砌外侧(放大图)

4 结 语

本文保温层的厚度及导热系数进行推导, 得到了不同设置方式下的保温导热系数公式, 运用公式法和数值模拟证明了在相同条件下, 保温层设置在隧道衬砌里面的保温效果要比设置在隧道衬砌表面好的结论。

同时在保温隔热层设计施工过程中, 还必须考虑其他各种优缺点, 比如保温层设置在最外的优点

是保温层不受结构力的影响、使二衬也在保温隔热层的作用范围之内、保温隔热层后期维修和更换方便, 缺点是影响对隧道衬砌状态的观测, 给隧道的整体维护增加困难。采用中间隔热处理的保温层, 由于初支属于柔性支护, 保温层将会受到来自围岩的压力作用, 且放在初喷和二衬之间的保温层一旦发生破坏, 将很难进行维修与更换, 双层保温层的优点是保温效果好, 但费用高, 经济性不佳。所以在实际工程中, 还需综合考虑各方面因素, 选择最佳保温方案。

参考文献:

- [1] 严家驷编著. 工程热力学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 55-58.
- [3] 仇文革, 等. 青藏铁路试验工程科研项目阶段成果报告——冻融作用对隧道结构影响分析[R]. 兰州, 2003: 124-130.
- [4] 乜凤鸣. 寒冷地区铁路隧道气温状态[J]. 冰川冻土, 1988, 10(4): 450-453.
- [5] 俞佐平, 陆 煜. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [6] 张 耀, 赖远明, 张学富. 寒区隧道隔热层设计参数的实用计算方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 66-70.