

# 事故闸门与露天水池相结合调压井设计研究

洪振国

(云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

**摘要:** 针对高水头、大流量、长引水隧洞的水电站,调压井布置受地形、地质条件限制以及常规型式不能满足设计要求的问题,以柏香林水电站为例,对比了事故闸门与蝶阀方案,以及各种调压井型式,通过调压井结构计算和水力计算论证了事故闸门与露天水池相结合调压井设计的合理性。结果表明:事故闸门与露天水池相结合调压井具有事故闸门和水室式调压井的优点,安全可靠较高,且方便检修管理。该型式调压井可有效地减少涌波高度,从而降低调压井的高度,节省工程量,减少投资,具有经济性和适用性,有效地解决了特殊地形地质条件调压井设计的难题,因此对调压井设计具有重要的参考价值。

**关键词:** 水电站; 调压井; 事故闸门; 露天水池

中图分类号: TV732.5<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)05-0162-05

## Research on design of surge shaft by combining emergency gate with outdoor pool

HONG Zhenguo

(Yunnan Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

**Abstract:** Aiming at the hydropower station of high head, large flow and long diversion tunnel, and that the conventional type can not meet the design requirements by the effect of terrain and geological conditions on surge shaft, taking Boxianglin hydropower station for example, the paper compared the emergency gate and butterfly valve scheme and a variety of surge shaft types. Through the surge shaft structure calculation and hydraulic calculation, it demonstrated the reasonability of design of surge shaft by combining the emergency gate with open-air pool. The results show that the combination of emergency gate and open-air pool, the surge shaft has the advantages of the emergency gate and water chamber surge shaft, higher safety and reliability, convenient management and maintenance, effective reduction of surge wave height, decrease of surge height, save of amount of work, reduction of investment, This kind of surge shaft has economy and applicability, and can effectively solve the problem of surge tank design under special topographic and geological conditions. The result has important reference value for the design of surge shaft.

**Key words:** hydropower station; surge shaft; accident gate; outdoor pool

新中国成立以来,随着水电建设的迅速发展,我国已建设了大批的水电站调压井,在设计、施工、科研各个领域中都取得不少成就<sup>[1]</sup>,对于大流量、高水头、长距离引水隧洞的水电站,调压井布置通常受到地形、地质条件限制,常规型式不能满足设计要求<sup>[2]</sup>。由事故闸门和露天水池相结合调压井具有事故闸门和水室式调压井的优点,因此有必要对事故闸门与露天水池相结合调压井设计进行研究。本文以柏香林

水电站调压井结构为例,对比了事故闸门与蝶阀方案,以及溢流式、简单圆筒式、阻抗式、差动式、水室式、分离式、闸门与水池相结合式8种调压井型式,通过调压井结构计算和水力计算论证了事故闸门与露天水池相结合调压井设计的合理性。

## 1 工程概况

柏香林电站为引水式电站,混凝土重力坝最大

坝高 28 m,总库容  $28.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,电站装机容量 50 MW,额定水头 195 m,引用流量  $30.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工程规模为中型工程,工程等级为Ⅲ级,根据工程等别,其主要建筑物包括拦河闸坝、取水口、引水隧洞、调压井、压力钢管道、厂房及升压站等。主要建筑物按 3 级设计<sup>[3-6]</sup>,次要建筑物按 4 级设计,临时性的建筑物按 5 级设计。

拦河闸坝布置于高桥电站下游 500 m 处,为混凝土重力坝,坝顶高程 1 219.50 m,坝高 28m,坝顶长 128.5 m,主要建筑物有冲沙底孔、溢流堰、冲沙泄洪底孔和 2 个泄洪表孔。取水口侧向取水,布置于左岸,为塔式进水口,进口底板高程 1 202.50 m,孔口尺寸  $4 \times 4\text{m}$ ,经渐变段与有压引水隧洞相接。引水隧洞整线布置于左岸,为有压圆形洞,隧洞总长 8114m,洞径 3.6m,隧洞出口接调压井,高程 1 169.11 m,平均坡度 4‰,全线设有 6 个弯道。调压井为事故闸门与露天水池相结合型式,闸门孔口尺寸为  $2.8 \times 2.8 \text{ m}$ ,调压井高约 49 m,长条形露天水池为调压井上室。事故调压井通过渐变段与压力管道联接。压力管道上游接调压井,下游连电站厂房主阀,全线地下埋管布置,包括三段平管和二段斜管,主管总长 625m,主管直径为两级变径 2.8 和 2.6 m,为一管双机的供水方式。厂区位于柏香林村北、洒渔河左岸河滩,包括主厂房、副厂房及开关站,为引水式地面厂房,副厂房布置于主厂房上游侧,开关站布置于厂房上游侧,机组安装高程 992.20 m。

## 2 事故闸门与蝶阀方案比选

在调压井下游 15 m 处设置阀室,蝶阀上下游与高压管道连接,蝶阀直径 DN2400 mm。其后设直径 0.6 m 的圆形通气孔兼进人孔。阀室平面尺寸  $9.5 \times 5.5 \text{ m}^2$ ,高 25 m。上设 50T/10T 的起重机。设直径 0.6 m 的圆形通风孔,利用 5# 施工支洞作为阀室的交通洞和排水通道。

蝶阀相较于事故闸门方案大大减小了竖井的开挖直径,竖井更安全可靠,工程投资也较少。但是,蝶阀相较于事故闸门,其工作的可靠性较低。首先,采用蝶阀代替事故闸门这种布置形式国内未有先例,无工程实例,其工作的可靠性认识不足;其次蝶阀的工作性质是快速事故蝶阀,电站运行中很少使用,电站运行管理过程中,工作人员容易疏于检修维护,对处于地下洞室中的蝶阀及其电气设备,因空气潮湿,容易老化、失效,当电站需要其投入工作时,可能蝶阀已不能使用,因此本工程采用事故闸门。

## 3 调压井型式比选

柏香林水电站调压井周边 400 m 范围内无泄水道位置,如采用泄水洞,泄流量近  $30.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,则投资较高。在其上游约 450 m 处有一天然冲沟,基岩出露,是一天然泄水道,但沟底 150 m 长段需做工程措施,并需从前池修一长 400 m 的泄水洞引至天然冲沟泄水,工程投资太大,所以不宜选择溢流式调压井。

由于柏香林水电站额定水头 195 m,引用流量  $30.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,引水隧洞总长 8 114 m,是高水头大流量长距离输水隧洞水电站,如果采用简单的圆筒式,调压井高度大约为 65 m,简单的圆筒式比事故闸门与露天水池相结合的调压井高 16 m,露出地面 12 m,工程量增大,不经济,运行不安全。

柏香林水电站为事故闸门与露天水池相结合的调压井,闸门孔口尺寸为  $2.8 \times 2.8 \text{ m}$ ,引水隧洞断面面积  $10.17 \text{ m}^2$ ,闸门井面积  $7.84 \text{ m}^2$ ,假如选用阻抗式调压井,闸门井兼作阻抗孔,阻抗孔面积为压力引水隧洞面积的 77.09%,对加速水面波动衰减和抑制波动幅度的效果则不明显,不满足《水电站调压室设计规范》阻抗孔面积为引水隧洞断面的 25%~45% 的要求,所以不宜选择阻抗式调压井。

差动式调压井由大室、升管及阻抗孔组成,衰减快,波动振幅小,水头损失小,反射水锤波较好,但是差动式调压井受地质条件制约,应用存在一定的风险,适用性较差,所以不宜选择差动式调压井<sup>[7]</sup>。

上室式调压井的常规上室采用洞室式,由于柏香林水电站调压井布置在地质较差、地形平整、覆盖层较厚的地质地形条件下,上室布置在覆盖层则开挖支护量很大,存在施工风险,上室难以成隧洞,所以不宜常规上室式调压井。

事故闸门与调压井分离式,根据柏香林水电站工程总体布置,在隧洞末端布置闸门,同时事故闸门的竖井与调压井相距较短,施工相互影响,存在施工风险,开挖支护量较大,所以不宜布置事故闸门与调压井分离式。

调压井前的输水隧洞总长 8 114 m,引水隧洞断面面积  $10.17 \text{ m}^2$ ,其内水的容积  $8.25 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,而调压井内水的容积  $0.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,水电站静水头 207.28 m,在调压井内设事故闸门,方便压力管道检修,同时防止高压的钢衬失稳后继续放空调压井事故闸门前的  $8.39 \times 10^4 \text{ m}^3$  水量,减轻高压水渗漏引起的电站厂房的破坏,因此柏香林水电站调压增设事故闸门很有必要。

针对柏香林水电站具有隧洞距离长、水头高、流量大的特点,调压井布置在地质较差、地形平整、覆盖层较厚的地质地形条件,柏香林水电站调压井选用事故闸门与露天水池相结合调压井型式,具有事故闸门和露天水池调压井的优点,采用露天水池作为调压井上室,开挖支护量小,施工方便,同时可作为丢弃负荷时储水之用,考虑水池能够限制水位继续上升,降低调压井高度,减少工程量,投资量小。调压井上游接引水隧洞,升井为半圆形断面,下游与快速事故闸门井连接,快速事故闸门井为半圆形断面,与上游升井组成一完整封闭的圆形断面,这种结构受力较好。水池池身边墙与底板分离,边墙采用贴坡重力式混凝土挡墙,有效地节省工程量,减少投资。

## 4 调压井结构计算

### 4.1 结构计算基本原理

调压井为事故闸门与露天水池相结合型式,断

面为圆形,其结构计算采用潘家铮主编、水利水电出版社出版的《水工隧洞和调压井-调压井部分》<sup>[8]</sup>中调压井的衬砌计算理论。结构计算采用薄壳与薄板理论计算,通过结构计算求得固端弯矩,并对调压井力矩分配,计算底板和井壁的弯矩,根据筒身的变形求得沿筒身的箍应力<sup>[9]</sup>。

### 4.2 调压井结构计算参数

调压井断面为圆形,前半圆为竖井,后半圆为事故闸门,内径 3.6 m,调压井采用 C20 钢筋混凝土衬砌,底板厚 1.5 m,竖井上部衬砌厚 0.60 m,下部衬砌厚 0.8 m。调压井井顶高程 1 218.00 m,底板高程 1 169.11 m。水库校核水位 1 218.00 m,正常水位 1 217.6.00 m,死水位 1 210.00 m,承受最大内水压力为 54 m。整个调压井上部穿过强风化薄层砂岩、粉砂岩、页岩等,为 V 类围岩;下部穿过弱风化薄层粉砂岩、砂岩、页岩,为 IV 类围岩。调压井的材料力学参数见表 1。

表 1 材料力学参数

材料名称	容重/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^3$ )	泊松比	弹性模量/ GPa	抗剪强度/MPa		单位抗力系数 $K_0 / (\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
				$f'$	$c'$			
IV 围岩	25.0	0.290	2	0.5	0.10	1.5		
V 围岩	26.0	0.310	1	0.4	0.08	1		
混凝土	24.5	0.167	25.5				10.0	1.10
钢筋	78.5	0.300	206				310	310

### 4.3 计算成果

调压井井筒的变形趋势从上至下增加,相应的变形也从上至下增加,井筒的最大变形 0.15 mm。井筒的箍应力变化与变形一致,最大箍应力 795 kN。调压井井筒的弯矩变化也与变形一致,最大弯矩 920  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。调压井底板的弯矩从板中心向外逐渐增大,最大弯矩 965 kN。

## 5 水力学计算

调压井水力学计算采用数值法,数值法计算通过取水口、引水隧洞、调压井、压力管道等部分组成水力学计算模型进行计算,根据波动衰减的小波动稳定要求,求出调压井所需的最小断面面积,按发生大波动过渡过程得到了调压井的最高和最低水位及水位变化过程,从而确定调压井的高度。

### 5.1 设置调压井的必要性计算

柏香林电站引水隧洞线路长 8 114 m,满负荷运行时引用流量 30.3  $\text{m}^3/\text{s}$ ,最小静水头 207.28 m。

根据设计规范公式计算,压力引水管道的惯性时间常数  $A_w = 8\text{s} > [A_w]$ ,一般取 2~4 s,特性值较大,为了减少管道中的水锤压力,引水隧洞水击波消除,供电稳定,在引水隧洞末端与压管道连接部位设置调压井是必要的。

### 5.2 调压井稳定断面计算

调压井稳定断面按《水电站调压室设计规范》<sup>[10]</sup>中的托马公式计算:

$$A = K \frac{LA_1}{2g(\alpha + \frac{1}{2g})(H_0 - h_{w0} - 3h_{wm})} \quad (1)$$

式中: $A$  为调压井稳定断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $K$  为系数,一般可取 1.0~1.1;  $L$  为压力引水道长度,  $\text{m}$ ;  $A_1$  为引水道断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $H_0$  为发电最小静水头,指上下游水位差,  $\text{m}$ ;  $\alpha$  为自水库至调压室水头损失系数,  $\alpha = h_{w0}/v^2$ ;  $h_{w0}$  为压力引水道水头损失,  $\text{m}$ ;  $v$  为压力引水道流速,  $\text{m/s}$ ;  $h_{wm}$  为压力管道水头损失,  $\text{m}$ 。

由于  $H_0 = 207.28 \text{ m}$ ,  $L = 8 114 \text{ m}$ ,  $A_1 = 11.17 \text{ m}^2$ ,  $h_{w0} = 14.28 \text{ m}$ ,  $h_{wm} = 9.5 \text{ m}$ ,按上述公式计算,

调压井计算的稳定断面积  $A = 29.84 \text{ m}^2$ 。

### 5.3 调压井最高涌波水位计算

在水库校核洪水位  $1\ 218.00 \text{ m}$  的条件下,二台机组同时甩满负荷时,取水隧洞的最小糙率计算水头损失,丢弃全负荷时调压井最高涌波由下式计算:

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

式中:  $x_c = \frac{z_c}{h_{u0}}$ ;  $\varepsilon_s = \frac{LfV_0^2}{2gF_s h_{u0}^2}$ ;  $\varepsilon_c = \frac{LfV_0^2}{2gF_c h_{u0}^2}$

式中:  $h_{u0}$  为取水隧洞的水头损失,  $m$ ;  $z_c$  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,  $m^2$ ;  $F_c$  为上室断面面积,  $m^2$ 。

由于  $h_{u0} = 10.28 \text{ m}$ ,  $L = 8\ 114 \text{ m}$ ,  $F_s = 29.6 \text{ m}^2$ , 按上述公式计算最高涌波,最高涌波  $z_{\max} = 5.109 \text{ m}$ , 对应的最高涌波水位  $1\ 223.109 \text{ m}$ 。

### 5.4 调压井最低涌波水位计算

在水库死水位  $1\ 210.00 \text{ m}$  的条件下,一台机组满负荷运行,第二台机组从空转突增到满负荷时,计算调压井最低涌波按下式计算:

$$\frac{z_{\min}}{h_{u0}} = 1 + \left( \sqrt{\varepsilon - 0.275\sqrt{m}} + \frac{0.05}{\varepsilon} - 0.9 \right) \cdot (1 - m) \left( 1 - \frac{m}{\varepsilon^{0.62}} \right) \quad (3)$$

$$m = \frac{Q}{Q_0}; \varepsilon = \frac{LfV_0^2}{2gFh_{u0}^2} \quad (4)$$

式中:  $z_{\min}$  为调压井最低下降水位,  $m$ ;  $\varepsilon$  为无因次系数,表示“引水道-调压室”系统的特性;  $Q$  为增加负荷前引水道中的流量,  $m^3/s$ ;  $Q_0$  为增加负荷后引水道中的流量,  $m^3/s$ 。

由于  $Q = 15.05 \text{ m}^3/s$ ,  $Q_0 = 30.1 \text{ m}^3/s$ ,  $m = 0.5$ , 按上述公式计算最低涌波,最低涌波  $z_{\min} = 31.29 \text{ m}$ ,最低涌波水位  $1\ 178.71 \text{ m}$ 。

### 5.5 调压井水池容积计算

在水库校核洪水位  $1\ 218.00 \text{ m}$  的条件下,二台机组同时甩满负荷时,容积按丢弃负荷时的涌水量确定,上室底部与上游最高静水位在同一高程,可按下式近似地计算上室的容积  $W_B$ :

$$W_B = \frac{LfV_0^2}{2gh_{u0}} \ln \left( 1 - \frac{h_{u0}}{z_{\max}} \right) \quad (5)$$

由于  $h_{u0} = 10.28 \text{ m}$ ,  $L = 8\ 114 \text{ m}$ ,  $z_{\max} = 5.109 \text{ m}$ , 按上述公式计算上室容积,上室容积为  $4\ 759 \text{ m}^3$ 。

## 6 调压井设计

柏香林电站调压井为事故闸门与露天水池相结合的调压井,由升井、露天水池、快速事故闸门、通气孔及其启闭室组成,各部份结构均采用钢筋混凝土结构,具体结构详见图1和图2。

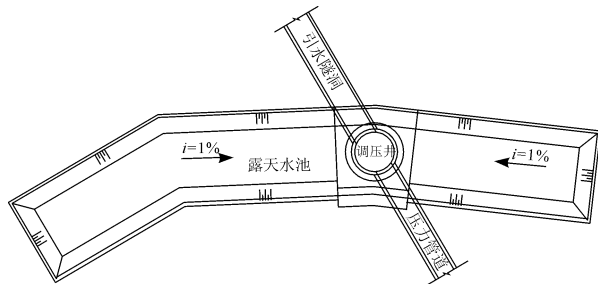


图1 调压井平面图

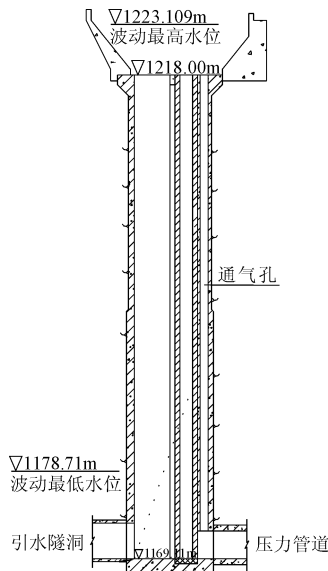


图2 调压井纵剖面

调压井上游接引水隧洞,井底板高程  $1\ 169.11 \text{ m}$  (即隧洞末底板高程),升井为半圆形断面,净半径  $r = 3.6 \text{ m}$ ,井顶高程  $1\ 218.0 \text{ m}$ ;下游与快速事故闸门井连接,快速事故闸门为半圆形断面,净半径  $r = 3.6 \text{ m}$ ;与上游升井组成一完整封闭的圆形断面,这种结构受力较好,井壁衬砌厚  $0.6 \sim 0.8 \text{ m}$ 。闸孔底板高程为  $1\ 169.11 \text{ m}$ ,孔口尺寸为  $2.8 \times 2.8 \text{ m}$ ,闸门采用后止水,其后设直径  $0.8 \text{ m}$  的圆形通气孔两根,通气孔从闸门伸至井顶。闸门后以方形断面  $2.8 \times 2.8 \text{ m}$  与内径为  $2.8 \text{ m}$  的高压管道首部断面相接,为了使水流条件更好,采用渐变段长  $4.5 \text{ m}$ 。并在闸室与升井上设启闭机室,闸门检修在上室,平台高程  $1\ 218.00 \text{ m}$ 。长条形露天水池为调压井的上室,

结构尺寸  $L \times B \times H$  (长  $\times$  宽  $\times$  高) =  $100 \times (10 + 15.93)/2 \times 5.85$  m, 池底板高程为校核洪水位, 池底板高程 1 218.0 m, 池顶高程 1 224.6 m。池身边墙与底板分离, 边墙采用贴坡重力式 C15 混凝土挡墙, 底宽 2 m, 顶宽 0.5 m; 底板采用 C20 钢筋混凝土厚 0.6 m。两端以  $i = 1\%$  底坡降至井筒。

## 7 结 论

(1) 蝶阀相较于事故闸门, 其工作的可靠性较低。首先, 采用蝶阀代替事故闸门这种布置形式国内未有先例, 无工程实例, 其工作的可靠性认识不足; 其次蝶阀的工作性质是快速事故蝶阀, 电站运行中很少使用, 电站运行管理过程中, 工作人员容易疏于检修维护, 对处于地下洞室中的蝶阀及其电气设备, 因空气潮湿, 容易老化、失效, 当电站需要其投入工作时, 可能蝶阀已不能使用, 因此本工程采用事故闸门。

(2) 对于长隧洞、高水头、大流量的水电站, 调压井布置在地质较差、地形平整、覆盖层较厚的地质地形条件, 采用事故闸门与露天水池相结合的调压井, 具有事故闸门和露天水池调压井的优点。快速关闭事故闸门, 方便压力管道检修, 同时防止高压钢衬段失稳破坏引起的渗漏, 减轻发电厂房破坏的不良后果。采用调压井的水池可有效地减少涌波, 降低调压井的高度, 节省工程量, 减少投资, 具有经济

性和适用性, 有效地解决了特殊地形地质条件调压井设计的难题, 今后进一步加强调压井型式和水力计算方法的研究, 不断提高积累新经验, 设计出具有经济性和适用性的新型调压井。

## 参考文献:

- [1] 华东水利学院. 水工设计手册 7(水电站建筑物)[M]. 北京:水利电力出版社, 1989.
- [2] 洪振国, 刘浩林, 黄立群. 水电站混合式调压井设计研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(12):111-114.
- [3] 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.
- [4] 洪振国, 刘浩林. 阻抗式调压井水力学计算研究[J]. 水力发电, 2014, 40(12):51-54.
- [5] 洪振国, 刘浩林. 水电站调压井特征线法水力学计算研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(4):163-166.
- [6] 洪振国, 王鹏. 露天上室式调压井在引水式电站中的设计研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3):194-198.
- [7] 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.
- [8] 潘家铮, 傅华. 水工隧洞和调压室(调压室部分)[M]. 北京:水利电力出版社, 1992.
- [9] 洪振国, 黄立群. 调压井结构内力计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4):177-182.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL655-2014 水电站调压室设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.