

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.06.030

# 水电站阻抗式受力复杂调压井设计

洪振国, 刘浩林

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

**摘要:** 引水式水电站中的调压井在系统稳定运行中起着重要作用。针对低水头、大流量、长距离引水隧洞的水电站,通过水力学、传统结构力学和有限元三种方法对简单式、阻抗式和带上架的简单式三种调压井形式进行计算比选。结果表明:阻抗式调压井具有经济性、波动衰减快、水头损失小、结构简单、施工方便等优点;对于稳定断面大、井筒高、体形多变及受力复杂的调压井,采用结构力学法和有限元法进行调压井计算,阻抗式调压井的受力较小,整体稳定,选用阻抗式调压井是合理的。因此,此方法具有的理论意义与工程实践价值。

**关键词:** 水电站;长引水隧洞;阻抗式调压井

**中图分类号:** TV732+.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2014)06-0148-06

## The Design of Complex Stress Impedance Surge Shaft of Hydropower Stations

HONG Zhen-guo, LIU Hao-lin

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

**Abstract:** The surge shaft of diversion type hydropower stations plays an important role in the stability of the system. Regarding to the hydropower stations with large flow, low water head and long distance diversion tunnel, the simple type, impedance type and the simple type with upper room surge shafts were calculated and compared by adopting hydraulic method, traditional structural mechanics method and finite element method. The results showed that: Impedance surge shaft had the advantages of economy, fast wave decay, small water head loss, simple structure and convenient construction; For a surge shaft with large stable section area, high shaft, complex shape and complex stress, through the calculation of structural mechanics method and finite element method, it was drawn that the impedance surge shaft suffered less stress, and remained stable on the whole. Therefore, the selection of impedance surge shaft is reasonable, and the application of this shaft has theoretical significance and practical value.

**Keywords:** hydropower station; long distance diversion tunnel; impedance surge shaft

引水式水电站中的调压井能够反射由压力管道传来的水锤波,避免引水隧洞所受较大的水锤压力,使水轮机和压力管道的水锤压力减少,在负荷变化时改进了水轮机的稳定运行条件和系统供电质量<sup>[1-2]</sup>。针对水头低、流量大、引水隧洞距离长的水电站,阻抗式调压井具有水位波动振幅小,波动衰减快<sup>[2]</sup>,工程量少,比较经济,结构简单,施工方便,水头损失小的优点。同时对于稳定断面大,井筒高、体形多变、受力情况复杂的阻抗式调压井,采用传统的结构力学计算仅能得到一个结构主要受力特征,无法精准地反映围岩与衬砌结构联合受力情况。有限

元法能很好的反映计算模型边界约束情况、调压井围岩特性和外部荷载等各种因素,计算精度高,适用于调压井受力、体形情况复杂的特点。因此对于体形多变、受力复杂的调压井先进行传统的结构力学法计算,然后进行有限元计算,使调压井结构满足安全性和经济性的要求。

本文以具有水头低、大流量、引水隧洞距离长的庙林水电站为例,针对其稳定断面大、井筒高、体形多变、受力情况复杂等特点,分别进行调压井位置选择、形式选择、以及水力学、传统结构力学和有限元法的模拟计算。

## 1 工程概述

彝良庙林电站是混凝土重力坝,总库容 1 158.4 万  $\text{m}^3$ ,最大坝高 50 m,年发电量 2.7883 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,年利用小时 4 290 h,装机容量 6.5 万  $\text{kW}$ 。庙林电站为中型规模的水电站,主要建筑物由大坝、进水口、有压引水隧洞、调压井、压力钢管道、厂房及升压站等组成<sup>[1-2]</sup>。

大坝为混凝土重力坝,顶轴线长 120 m,主要有泄洪、冲沙、排污等建筑物。电站进水口布置于拦河坝右岸坝体,为竖井式进水口,由进口段、竖井闸室段等建筑物组成,进水口闸室经渐变段与有压引水隧洞相接。引水隧洞全线布置于右岸,隧洞总长 8 157.506 m,为有压圆形隧洞,隧洞出口接调压井,

全线设有 7 个转弯。调压井采用阻抗式调压井,井筒高 67.96 m,为地下式调压井。调压井通过渐变段与压力管道连接。压力管道上接调压井,下连电站厂房,全线地下埋管布置,采用一管双机的供水方式。厂区位于洛泽河右岸坡地上,包括主厂房、副厂房及开关站,为引水式地面厂房。

调压井布置在洛泽河右岸山体中,围岩为薄~中层状、性脆的大路寨组(S2d)硅质泥岩<sup>[3-4]</sup>。顶壁围岩厚度  $\geq 75$  m,调压井侧壁围岩厚度  $\geq 54$  m;调压井围岩除开挖暴露易风化崩解,局部存在掉块现象外,具有节理裂隙不发育,弱风化,岩体较完整的围岩。地下水埋深大于 150 m,地下水位位于调压井中部,在开挖中有少量的渗水现象,调压井的围岩地质参数见表 1。

表 1 调压井地质参数

围岩类型	密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	变形模量 $E_0/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	摩擦角 $\phi$ /( $^\circ$ )	凝聚力 $c$ /MPa	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa
第四系残坡积层	1.80	20	0.38	23.0	0	—	—
崩堆体	2.00	47	0.35	27.0	0	—	—
弱风化大路寨组	2.55	$6.5 \times 10^3$	0.27	35.0	0.40	1	75
强风化大路寨组	2.40	$1.0 \times 10^3$	0.31	29.0	0.30	—	60
弱风化硅质泥岩	2.55	$6.5 \times 10^3$	0.28	33.5	0.35	1	75
强风化硅质泥岩	2.40	$1.5 \times 10^3$	0.33	29.0	0.20	—	60

## 2 调压井设计

### 2.1 设置调压井的必要性

根据《水电站调压室设计规范》<sup>[5]</sup>(DL/T5058—1996)规定,当下面不等式成立时,应设置上游调压井。

$$\sum L_i v_i > (20 \sim 40) H_p \quad (1)$$

式中:  $L_i$  为上游蜗壳、压力水道、蜗壳、尾水管延伸段及尾水管各段的长度(m);  $v_i$  为各压力管段对应的平均流速(m/s);  $H_p$  为设计水头(m)。

庙林电站引水隧洞总长 8 157.506 m,设计水头 68 m,满负荷运行时引用流量 111.3  $\text{m}^3/\text{s}$ 。依据上面设置上游调压井条件公式计算,  $40H_p = 2720 < \sum L_i v_i = 17272$ ,为了消除水击波在引水隧洞中的扩展,降低高压管道中的水击压力,改进了水轮机在负荷变化时的系统供电质量及稳定运行条件,机组调保计算满足设计规范要求,所以在有压引水隧洞末端需要设置调压井。

### 2.2 调压井位置选择

庙林电站为引水式电站,通过对上、下、左岸三

个厂址进行比较发现:从地形上看,下厂址区的河面高程 718 m,两岸地形相对较为开阔,厂址上游侧有一河滩,对外交通条件较好,有利于施工场地布置,方便于以后电站运行及电站管,容易布置厂区枢纽,方便于升压站进出线;同时从地质分析,下厂址区砂砾石层覆盖浅,厂房基础好,山坡崩堆体厚度较小,厂房开挖边坡稳定且处理简单,因此综合考虑选定下厂址。

考虑在满足调压井布置要求条件下,调压井尽量靠近厂房,地形相对平缓,调压井建在较好的基岩内等因素确定调压井的位置,在转咀村下游 380 m 布置庙林电站调压井,此处地质情况较好<sup>[4]</sup>,围岩为弱风化硅质泥岩,基岩出露,整个山体完整稳定,地形坡度  $57^\circ$  的陡崖山体中<sup>[4]</sup>。

由于调压井具有断面较大、高度较高的特点,调压井位于完整稳定基岩内,将调压井各部分均采用地下式布置,有效地利用山体的围岩承担部分内水压力。这样不仅避免对高陡山坡的开挖形成高边坡,减少防护措施工程量,有利于调压井经济和运行安全管理。

## 2.3 调压井结构设计

庙林水电站调压井布置引水隧洞末端,调压井采用阻抗式调压井,结构主要由交通洞、竖井、阻抗孔组成。交通洞兼通气洞,交通洞长 77m,采用城门洞型,横断面衬砌后尺寸 5.2 m × 4.5 m,纵坡为 4.162%,交通洞底板高程 833.66 m,比最高涌浪水位高 1.4 m。调压井竖井为了方便施工,结构受力条件好,竖井采用圆形井筒结构,竖井衬砌后内径 20 m,井筒高 67.96 m。竖井衬砌厚 1.0 m ~ 2.5 m,竖井通过 10 m 渐变段与压力钢管相连,根据调压井设计规范,最低涌浪水位与调压井处压力引水输洞顶部之间的安全高度应不小于 2 m ~ 3 m 准则确定竖井底板高程,由于最低涌浪水位 785.21 m,引水隧洞较长,引水隧洞末端高程为 765.7 m,最终竖井底板高程的 765.7 m。同时根据调压井最高涌浪水位以上的安全超高不宜小于 1.0 m 准则确定竖井顶高程,由于最高涌浪水位 832.26 m,最终竖井顶高程的 833.66 m。由于阻抗孔口面积比越小,最高涌浪水位越低,同时底板压力差也越大。为了调压室底板向上的压力差应控制在结构设计允许的范围内,以确保调压井运行安全。对庙林水电站计算成果分析,阻抗孔口直径在 3.3 m 是合适的,其面积在设计规范推荐的范围内,此时正常工况丢弃负荷后底板向上的最大压力差为 18.909 m。

## 3 调压井的形式计算比选

关于简单式、阻抗式和带上室的简单式三种形式的调压井,简单式由圆形断面竖井和交通洞组成,

阻抗式调压井结构主要由圆形竖井、阻抗孔和交通洞组成。带上室的简单式由上室、圆形竖井和交通洞组成,其中交通洞和上室采用城门断面,具体结构图如图 1 ~ 图 3。

简单式调压井反射水锤波良好的效果,结构简单,但是衰减慢,相对的水位波动幅度大,正常运行时水流通过底部的较大水头损失,通常调压井较高,工程量较大,不经济;阻抗式调压井虽然有较差的水锤波反射,水锤波少部分进入到有压引水隧洞,使引水隧洞压力增加,由于引水隧洞内水压力比较小,水锤压力增加部份对调压井结构的影响在可设计的范围内,阻抗式调压井水位波动衰减相对较快<sup>[2]</sup>,正常运行时水头损失小,较小的波动振幅,工程量较小,同时结构简单,施工可采用反井钻机开挖,先自上而下钻孔开挖形成先导孔,然后用反井钻机自上而下扩挖,开挖施工方便,圆断面衬砌方便滑模施工。带上室简单式调压井上室的底板高程为最高静水位,供丢弃负荷时储水之用,当调压井周围没有通风洞、交通支洞、地质勘测探洞、试验洞等加以扩挖改造,作为调压的上室时,通常情况带上室简单式调压井工程量较大,不经济<sup>[6]</sup>。

### 3.1 水力学计算

根据《水电站调压室设计规范》计算公式,分别对简单式、阻抗式和带上室的简单式三种形式的调压井进行水力学计算,计算得到三种形式的调压井特性见表 2。

根据水力学计算结果,确定调压井的结构,三种形式的调压井主要工程量见表 3。

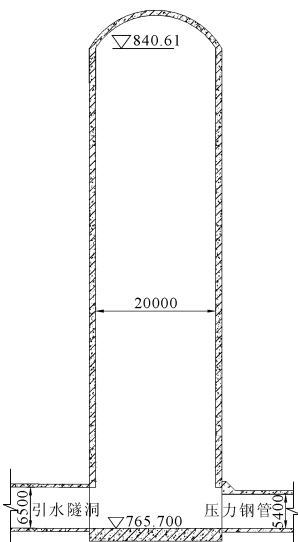


图 1 简单式调压井纵剖面图

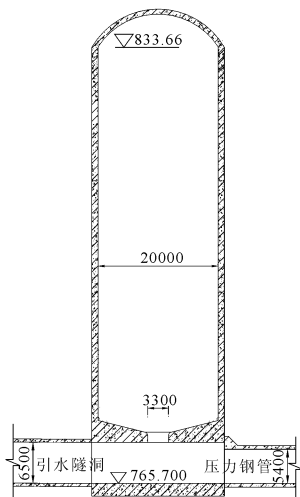


图 2 阻抗式调压井纵剖面图

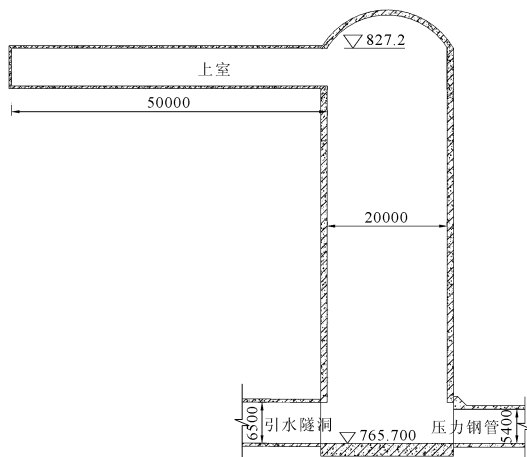


图 3 带上室的简单式调压井纵剖面图

表 2 三种形式调压井特性

调压井形式	圆筒直径 /m	稳定断面 /m <sup>2</sup>	最高涌波水位/m	最低涌波水位/m	井顶高程 /m	实际井底高程/m	上室容积 /m <sup>3</sup>	阻抗孔径 /m
简单式	20	314	839.21	781.67	840.61	765.70	—	—
阻抗式	20	314	832.26	785.21	833.66	765.70	—	3.3
带上室简单式	20	314	825.80	781.67	827.20	765.70	1600	—

表 3 三种形式调压井主要工程量

调压井形式	项目	工程量
简单式	竖井石开挖/m <sup>3</sup>	36 020
	C20 混凝土/m <sup>3</sup>	6 760
	C20 回填混凝土/m <sup>3</sup>	954
	钢筋/t	529
	回填灌浆/m <sup>2</sup>	844
阻抗式	竖井石开挖/m <sup>3</sup>	33 149
	C20 混凝土/m <sup>3</sup>	6 275
	C20 回填混凝土/m <sup>3</sup>	877
	钢筋/t	524
	回填灌浆/m <sup>2</sup>	844
带上室简单式	竖井石开挖/m <sup>3</sup>	64 128
	C20 混凝土/m <sup>3</sup>	11 991
	C20 回填混凝土/m <sup>3</sup>	1 782
	钢筋/t	894
	回填灌浆/m <sup>2</sup>	2 890

由表 2 可知,三种调压井圆筒直径一样时,阻抗式调压井的计算高度比带上室简单圆筒调压井高 6.46 m,圆筒式调压井计算高度比阻抗式调压井高 6.95 m,而带上室简单圆筒调压井上室容积为 1 600 m<sup>3</sup>,由于有压引水隧洞为长距离隧洞,三种调压井底板高程都为隧洞出洞口高程,故调压井实际井底高程为 765.7 m。

由表 3 得知,阻抗式调压井比带上室简单圆筒调压井土方开挖少 30 979 m<sup>3</sup>,C20 混凝土衬砌量少 5 716 m<sup>3</sup>,C20 回填混凝土量少 905 m<sup>3</sup>,钢筋量少 370 t,回填灌浆量少 2 006 m<sup>3</sup>。阻抗式调压井较圆筒式调压井高度低 6.95 m,C20 混凝土衬砌量少 485 m<sup>3</sup>,井挖土方少 2 871 m<sup>3</sup>,C20 回填混凝土量少 77 m<sup>3</sup>,钢筋量少 5 t。

### 3.2 结构力学计算

实际结构的几何形状及受力状态一般很复杂,如果想完全按照结构的实际工作状态进行结构力学计算,往往都比较困难,故一般在结构力学计算中将实际结构加以简化并略去某些次要因素,得到一个既能反映结构主要受力特征,又比较简单的计算图形,计算简图应尽可能符合实际结构的工作状态及

主要受力特征。

采用文献[6]调压井的衬砌计算理论对简单式、阻抗式和带上室的简单式三种形式的调压井分别进行结构力学计算。

结构计算时,根据调压井运行情况、地质条件及结构布置特点,按两种荷载工况进行:(1) 最高内水压力 + 内水重 + 围岩压力;(2) 围岩压力 + 外水压力。经结构计算,第一种工况为运行控制工况,经计算得到三种形式的调压井运行控制工况受力成果如表 4 所示,相应的调压井结构计算图如图 4 ~ 图 6,图中最大箍应力、最大弯矩与三种形式调压井运行控制工况受力成果与表 4 相对应。

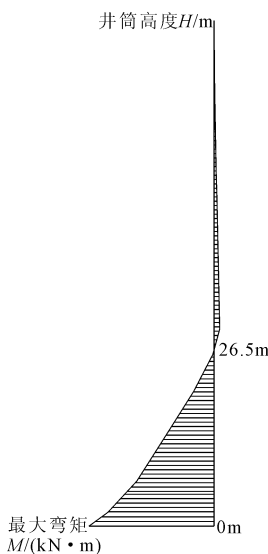


图 4 井筒弯矩图

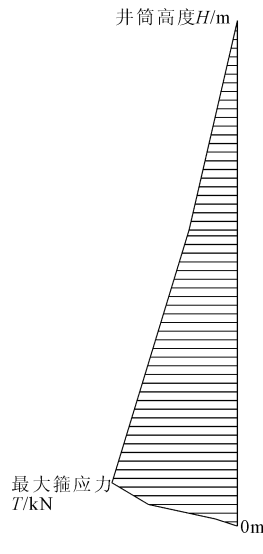


图 5 井筒箍应力图

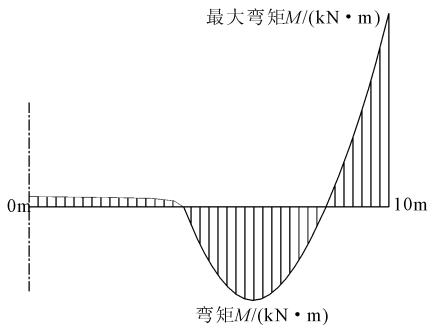


图 6 底板弯矩图

由调压井筒弯矩图 4 可知,三种形式调压距井

筒底板 26.5 m 以上弯矩接近 0, 距井筒底板 26.5 m 至调压井底板, 弯矩逐渐增大, 在井筒与底板交汇处井筒弯矩最大。由调压井筒箍应力图 5 可知, 井顶部受力为 0, 井筒顶至调压井底板, 箍应力逐渐增大, 在井筒与底板交汇处井筒箍应力最大, 由调压井底板弯矩图 6 可知, 最大的弯矩为负弯矩, 在井筒与底板交汇处。由表 4 可知, 阻抗式调压井的井筒最大

弯矩比带上室简单式调压井大 4.9 kN·m, 阻抗式调压井的井筒最大弯矩比圆筒式调压井小 5.4 kN·m, 阻抗式调压井的井筒最大箍应力比带上室简单式调压井大 5.2 kN, 阻抗式调压井的井筒最大箍应力比圆筒式调压井小 5.8 kN, 阻抗式调压井的底板最大弯矩比带上室简单式调压井大 4.9 kN, 阻抗式调压井的底板最大弯矩比圆筒式调压井小 5.4 kN。

表 4 三种形式调压井控制工况受力表

调压井形式	距井筒底板 26.5 m 以上最大箍应力/kN	距井筒底板 26.5 m 以上弯矩/(kN·m)	从井筒底板至 26.5 m 最大箍应力/kN	从井筒底板至 26.5 m 最大弯矩/(kN·m)	调压井底板最大弯矩/(kN·m)
简单式	879.5	接近 0	1014.4	1033.5	1159.2
阻抗式	874.1	接近 0	1008.6	1028.1	1153.8
带上室简单式	869.2	接近 0	1003.4	1023.2	1148.9

### 3.3 有限元计算

有限元法计算基本原理: (1) 把一个连续的弹性体划分成由有限多个有限大小的区域组成的离散结构, 这些有限大小的区域称为有限单元, 单元之间相交的点称为节点。平面问题常用的单元有矩形单元、三角形单元、任意四边形单元等。空间问题常用的单元有长方体单元、四面体单元、任意六面体单元等<sup>[7-8]</sup>。(2) 将单元内任一点的位移用简单的函数来近似地表示, 并在节点处使其函数值等于该节点位移值。从而可根据单元的节点位移值来确定单元内的位移场。(3) 作用于单元节点的节点力(外荷载)应与作用于单元节点的弹性力平衡, 逐节点建立平衡方程可得出总体平衡方程, 这是一组以节点位移为未知量的线性方程组。也可由最小势能原理建立总体平衡方程。(4) 将已知的几何边界条件(已知的节点位移)代入总体方程, 解出节点位移<sup>[7,9]</sup>。

对简单式、阻抗式和带上室的简单式三种形式的调压井进行了调压井结构有限元计算, 模型底面采用垂直方向的位移约束(零位移边界), 地表为自由边界; 模型靠近河床侧为位移约束(零位移边界), 靠近山体一侧为应力边界(一种方案水平应力为  $0.8\gamma_{\text{岩石}}H$ , 其中  $H$  为从地表到计算应力处的垂直距离,  $\gamma_{\text{岩石}}$  为岩石的重度)<sup>[4]</sup>; 模型垂直河床的一侧为应力边界(大小为  $0.8\gamma_{\text{岩石}}H$ , 其中  $H$  为从地表到计算处的垂直距离,  $\gamma_{\text{岩石}}$  为岩石的重度), 另一侧为位移约束边界(零位移边界)<sup>[4]</sup>。有限元模型共划分为节点数 54 429 点, 单元数 39 700 个, 调压井有限元计算模型如图 7。

调压井有三个工况, 分别为施工工况、运行工况

和检修工况, 运行工况为控制工况, 经计算得到阻抗式调压井运行工况应力图如图 7 ~ 图 10, 三种形式的调压井控制工况应力成果见表 5。

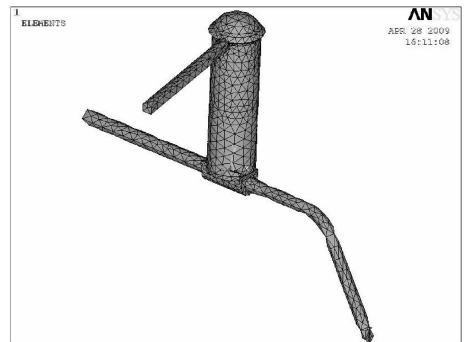


图 7 阻抗式调压井有限元模型

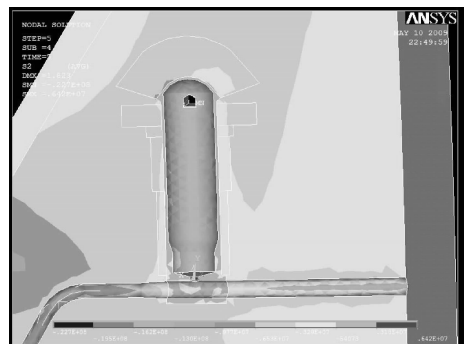


图 8 阻抗式调压井控制工况第一主应力

从阻抗式调压井控制工况第一主应力图 7 可以看出, 调压井围岩的第一主应力主要有拉应力和压应力, 在调压井山体侧引水隧洞、调压井围岩出现了拉应力, 其它围岩大部分为压应力。最大压应力出现在调压井与交通洞相交汇处, 最大拉应力为有压引水隧洞靠山体侧<sup>[3,10]</sup>。

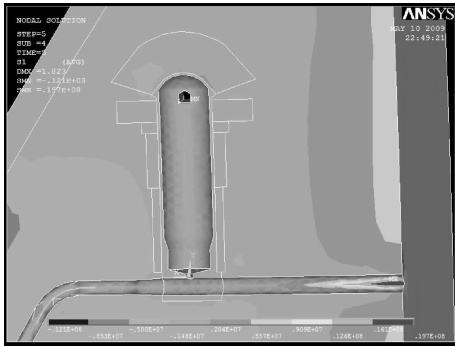


图 9 阻抗式调压井控制工况第二主应力



图 10 阻抗式调压井控制工况第三主应力

表 5 三种形式调压井控制工况应力计算成果

调压井形式	拉应力最大 值/MPa	最大拉应 力部位	压应力最大 值/MPa	最大压应 力部位
简单式	0.310	调压井底板	0.19	调压井底板
阻抗式	0.290	调压井底板	0.15	调压井底板
带上室简单式	0.285	调压井底板	0.12	调压井底板

从阻抗式调压井控制工况第二主应力图 8 可知,调压井围岩的第二主应力主要有拉应力和压应力,在调压井河床侧井筒下部有较大压应力。最大拉应力和最大压应力都出现在调压井与交通洞相交处<sup>[3]</sup>。

从阻抗式调压井控制工况第三主应力(图 9)可以看出,调压井围岩的第三主应力主要为压应力,最大压应力和最大拉应力都出现在交通洞与调压井交汇处。

从阻抗式调压井主应力(图 7~图 9)可知,在均匀分布围岩应力处布置调压井,对调压井的受力情况和稳定性相对有利<sup>[3-4]</sup>,由三种形式调压井控制工况应力计算成果表 5 可知,三种形式调压井混凝土结构的应力值较小,调压井混凝土结构不会产生破坏,调压井的整体是稳定的。

## 4 结 论

对于水头低、大流量、距离长引水隧洞的水电站,稳定断面大、井筒高、体形多变、受力情况复杂调压井,经水力学、传统结构力学法和有限元法对简单

式、阻抗式和带上室的简单式三种调压井形式进行计算比选研究,阻抗式调压井虽然水锤波反射较差,水锤波少部分进入有压引水隧洞,引水隧洞压力增加,但是引水隧洞内水压力比较小,水锤压力增加部份对调压井结构的影响在可设计的范围内<sup>[2]</sup>,阻抗式调压井结构简单,波动衰减快,正常运行时水头损失小等优点。阻抗式较带上室简单圆筒调压井及圆筒式调压井工程量少,工程投资也少<sup>[2]</sup>,具有经济性。同时阻抗式调压井采用反井钻机开挖,先自上而下钻孔开挖形成先导孔,然后用反井钻机自上而下扩挖,开挖施工方便,圆断面衬砌方便滑模施工,最终选用阻抗式调压井。

经过传统结构力学计算,调压井的相对受力较小,调压井结构尺寸满足了调压井钢筋混凝土强度及限裂要求。通过有限元法计算,在调压井设计布置位置围岩应力的主应力大小相对比较均匀分布,对调压井的稳定性和受力情况比较有利<sup>[3-4]</sup>,调压井混凝土结构的应力值较小,调压井混凝土结构不会产生破坏,调压井的整体是稳定,所选取阻抗式调压井是合理的。

对于体形多变和受力复杂的调压井,采用传统的传统结构力学法仅能得到一个结构主要受力特征,无法精准地反映围岩与衬砌结构联合受力情况。有限元法具有很好的计算模型反映边界约束情况、调压井围岩特性和外部荷载等各种因素,计算精度很高,具有经济性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 陆雪萍.水电站调压井结构有限元分析[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [4] 邹云鹤.调压井开挖过程有限元模拟及流体倒灌仿真分析[D].昆明:昆明理工大学,2012.
- [5] 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,1996.
- [6] 潘家铮.水工隧洞和调压室[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [7] 江启升.大内径调压井结构及洞室围岩稳定三维有限元分析[D].成都:四川大学,2004.
- [8] 张镭漓.坝基下残留强风化岩层的处理研究[D].成都:四川大学,2006.
- [9] 刘 强.昔格达地层中隧洞结构和施工问题的探讨[D].成都:四川大学,2005.
- [10] 刘 军.大型长廊式调压室围岩稳定性及结构特性三维有限元分析[D].成都:四川大学,2006.