

调压井结构内力计算研究

洪振国, 黄立群

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘 要: 针对目前水电站调压井结构向体形巨大化、地质条件多样化、受力条件复杂化发展的方向, 内力计算方法对调压井安全性和经济性非常重要。通过结构力学法、线弹性有限元法和非线性有限元法 3 种方法计算, 分析计算调压井结构的受力特征。结果表明: 调压井的内力自上而下逐渐增加, 较大内力在井筒与底板相接处, 最大内力在压力钢管开孔下缘点。调压井底板的内力由板中心向外增大, 在底板与井筒相接处内力较大。经这 3 种计算方法比较, 非线性有限元法计算内力最小, 配筋量最小。因此非线性有限元法精准反映结构实际受力情况, 使调压井结构配筋最经济 and 合理, 使选定调压井的结构为最优结构。

关键词: 水电站; 调压井内力; 结构力学法; 线弹性有限元法; 非线性有限元法

中图分类号: TV732.51

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0177-06

Research on internal force calculation of surge shaft structure

HONG Zhengguo, HUANG Ligu

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

Abstract: Aimed at the present direction that the hydropower station surge shaft structure develop to the great shape, geological conditions of diversification, complicated stress condition, the internal force calculation method of surge shaft is very important to safety and economy. By the methods of structural mechanics, linear elastic finite element and nonlinear finite element, the paper analyzed the force characteristics of surge shaft structure. The result showed that the internal force of surge shaft increases from top to down gradually, the larger internal force of surge shaft appears at the connection part between shaft and bottom plate, the maximum internal force is in the open lower edge point of pressure pipe. The internal force of surge shaft increases from the center of plate to outward. The internal force in the connection part between bottom plate and shaft is larger. The comparison of the three methods indicated that the internal force calculated by nonlinear finite element method by is the minimum, the amount of reinforcement is the minimum. So nonlinear finite element calculation can accurately reflect the structure of actual stress. The reinforcement of surge shaft structure is the most economical and reasonable. The structure of selected surge shaft is the optimum.

Key words: hydropower station; internal forces of surge shaft; structural mechanics method; linear elastic finite element method; nonlinear finite element method

由调压井自由水面反射水击波, 阻止水击波进入压力水道, 以满足机组调节保证的技术要求。改善压力水道的压力状态, 同时改善机组在负荷变化时的运行条件及供电质量^[1]。目前水电站调压井结构向体形巨大化、地质条件多样化、受力条件复杂化的方向发展。调压井结构内力计算对调压井的结构选取和调压井的安全性和经济性非常重要。

对于调压井结构内计算的研究, 很多学者作了大量工作^[2-5], 目前应用较广泛的为传统结构力学法和线弹性有限元法。本文以工程实例通过调压井结构力学法、线弹性有限元法和非线性有限元法, 给出了 3 种计算方法的计算参数、基本原理与步骤、基本方程和计算模型, 分析了调压井结构整体位移趋势和结构内力分布的规律。对比分析调压井 3 种计

算方法所考虑边界约束情况、调压井围岩特性和外部荷载等各种因素,得到对应内力大小和配筋面积,进一步分析选用合理的计算方法对调压井结构具有经济性和可靠性,为类似工程提供借鉴与参考。

1 工程概况

腊寨水电站为引水式电站,由首部枢纽、引水系统、厂区枢纽等组成。主要建筑物有混凝土重力坝、泄洪冲沙隧洞、取水口、压力引水隧洞、调压井、压力钢管道、发电厂房及户外开敞式开关站等^[6-11]。电站为中型Ⅲ等工程,其主要建筑物为3级,次要建筑物为4级,临时建筑物为5级。水电站的引水方式为一管三机,重力坝最大坝高68 m,总库容599.6万m³,电站额定水头68.5 m,电站装机容量120 MW。

腊寨水电站调压井为地下式调压井,调压井上

部为Ⅳ类围岩,调压井下部Ⅲ类围岩,调压井地表地形坡度约35°~50°,调压井岩性为高黎贡山群下段灰色片麻岩,岩体全至微风化,岩块强度较高,基础满足调压井承载力要求。

2 计算参数

腊寨水电站调压井为溢流式带下室圆筒式调压井,调压井高51.4 m,井筒直径为17.5 m,底板高程1 057.5 m,溢流堰顶高程为1 102.5 m,调压井顶高程为1 108.9 m。调压井采用C20 钢筋混凝土衬砌,井筒衬砌厚1.2 m,底板厚2 m。下室长100 m,直径由9.0 m 渐变到5.941 m。调压井最高涌波1 106.90 m,最低涌波1 077.67 m,当井筒内水位超过正常水位1 102.5 m 时,调压井水通过溢流堰溢流。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/ (kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/ GPa	抗剪强度/MPa		单位抗力系数 K ₀ /(GPa·m ⁻¹)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
				f'	c'			
Ⅲ围岩	26	0.27	8	0.6	0.3	2		
Ⅳ围岩	25	0.29	2	0.5	0.1	1.5		
混凝土	24.5	0.167	25.5				10.0	1.10
钢筋	78.5	0.3	206				310	310

3 结构力学法

3.1 基本原理与步骤

结构力学法采用薄壳与薄板理论进行计算,根据已知参数和计算公式分别计算调压井井壁及底板的挠曲度,按挠曲度、荷载、几何参数求得固端弯矩,并对井壁和底板进行力矩分配,计算井壁和底板各点的弯矩。同时根据沿筒身的变形、荷载、几何参数求得沿筒身的箍应力。结构力学法以考虑自重+最高涌流荷载组合下的荷载效应为设计控制工况进行结构计算。

3.2 基本方程

衬砌的挠曲度计算公式:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu)^2}$$

(1)

式中: E 为混凝土弹性模量,kN/m²; ν 为混凝土泊松比; t 为衬砌厚度,m。

固端弯矩计算公式:

$$M^F = \frac{-\gamma H^3}{2} \cdot \frac{1}{(\beta H)^2} (1 - \frac{1}{\beta H})$$

(2)

式中: γ 为水的单位重,kN/m²; H 为调压井的最高内水高,m; R 为井筒衬砌中线的半径,m; β 为参数,β = $[\frac{Et + kR^2}{4R^2D}]^{\frac{1}{4}}m^{-1}$; k 为围岩弹抗系数,kN/m³。

筒底的弯矩计算公式:

$$M_0 = M^F + M^l$$

(3)

式中: M^l 为调整弯矩,kN·m/m。

筒底向 x 处的弯矩计算公式:

$$M_x = M_0\phi(\beta x) + \frac{V_0}{\beta}\xi(\beta x)$$

(4)

式中: x 为坐标,指衬砌上各点距井底板的垂直距离,m; φ(βx) 为 βx 的函数,φ(βx) = e^{-βx}(cosβx + sinβx); ξ(βx) 为 βx 的函数,ξ(βx) = e^{-βx}sinβx。

沿筒身的变形计算公式:

$$y = \frac{p}{K} - \frac{1}{2\beta^3D}[\beta M_0\psi(\beta x) + V_0\theta(\beta x)]$$

(5)

沿筒身的箍应力计算公式:

$$T = \frac{Et}{R}y$$

(6)

式中: p 为水压力强度, kN/m^2 ; $\theta(\beta x)$ 为 βx 的函数, $\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x$; K 为折算地基抗力系数, $K = \frac{Et}{R^2} + k$ 。

3.3 计算成果分析

经上述基本公式计算沿筒身的箍应力成果见表 2,筒身的弯矩成果如见表 3,筒底的弯矩成果见表 4。表 2、3、4 中计算调压井各高程断面强度配筋量,整个截面配筋按双层配筋,未考虑最小配筋率要求,并根据裂缝计算公式,计算出了满足限裂要求 ($W_{\max} = 0.25 \text{ mm}$) 的配筋。

表 2 调压井沿筒身各高程断箍应力成果表					
高程/ m	筒身的 变形/ mm	箍应力/ kN	筒身衬 砌厚/ m	强度配 筋面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	限裂配 筋面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)
1090.0	0.19	740	1.2	2812	5600
1085.0	0.24	780	1.2	2964	6200
1075.0	0.36	1180	1.2	4490	9000
1065.0	0.38	1260	1.2	4790	9600
1057.5	0.20	680	1.2	2684	5800

表 3 调压井沿筒身各高程弯矩成果表					
高程/ m	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	筒身衬 砌厚/ m	强度配 筋面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	限裂配 筋面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	
1090.0	50	1.2	340	1000	
1085.0	150	1.2	900	2000	
1075.0	250	1.2	1672	2800	
1065.0	360	1.2	2418	3600	
1057.5	1011	1.2	7016	8500	

由表 2 可知:调压井的井筒的变形趋势与自重作用下一致,井筒的变形自上而下逐渐增加,井筒的变形从 0.19~0.38 mm,井筒的箍应力自上而下逐渐增加,箍应力从 740~1 260 kN,相应的井筒的配筋面积自上而下逐渐增加。

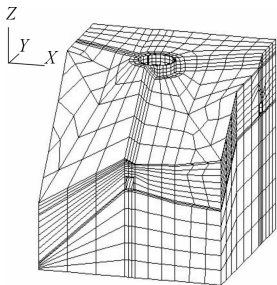


图 1 整体模型网格

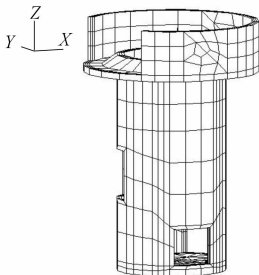


图 2 井筒部分网格

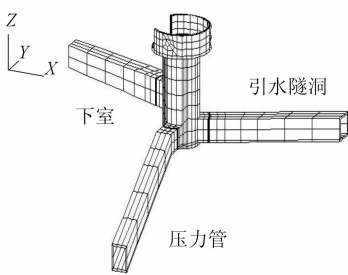


图 3 调压井衬砌部分网格

由表 3 可知:调压井的井筒的弯矩自上而下逐渐增加,弯矩从 50 kN/m 至 1 011 kN/m ,相应的井筒的配筋面积自上而下逐渐增加,在井筒与底板相接处内力和配筋较大。

由表 4 可知:调压井底板的内力由板中心向外增大,弯矩从 210 kN/m 至 1 029 kN/m ,相应的底板的配筋面积由板中心向外增大,在底板与井筒相接处内力和配筋较大。

表 4 调压井筒底的弯矩成果表				
高程/ m	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	筒身衬 砌厚/ m	强度配 筋面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	限裂配 筋面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)
0	210	2.0	822	1700
3	516	2.0	2028	3000
5	580	2.0	2282	3600
9	1029	2.0	4078	5000

4 线弹性有限元法

4.1 有限元计算模型

岩体单元及混凝土单元均采用八结点六面体实体单元,压力钢管内衬采用薄壳单元。计算模型单元总数 8 502,结点总数 9 392。调压井四周岩体边界:取井壁结构外缘到岩体边界为调压井外径的 3 倍,底部岩体取 2 倍结构总高度。

坐标系方向为:竖直方向上为 Z 轴,沿压力钢管轴线为 Y 轴,水流方向为负方向,垂直压力钢管轴线的水平方向为 X 轴,原点取在调压井圆心处。

约束条件:四周岩体各个侧面和底面的边界均加法向约束。有限元计算模型及其坐标轴方向见图 1、图 2 和图 3。

4.2 线弹性有限元法分析

调压井控制工况为考虑自重 + 最高涌浪荷载组合下的荷载效应,采用 ANSYS 有限元软件进行计算,计算成果为调压井结构位移等值线分布图 4~7,井筒结构外壁和内壁的主应力等值线分布图 8~11。

从调压井结构位移等值线分布图 4~7 分析,结构整体位移趋势与自重作用下一致,结构整体位移为自上而下逐渐增加,竖向位移等值线在调压井底板处密集,最大值发生底板附近,值为 1.09 mm。X 轴方向位移,在井筒上部数值较小,不到 0.103 mm,在下部由于结构上开孔,在水压作用下,孔侧中部位移,相对较大,最大值在达 0.53 mm,位于压力钢管

开孔的孔侧中间位置。Y 轴方向位移也很小,最大值在达 0.36 mm,沿 Y 轴负方向,位于压力钢管开孔的顶部两个角点附近。根据井筒结构外壁和内壁的主应力等值线分布图 8~11 分析,调压井应力自上而下逐渐增加,应力值在井筒上部由于水压较小,数值很小,下室底板以上区域拉应力都在 0.6 MPa 以内。底板及接近底板附近的井筒等值线密集,应力

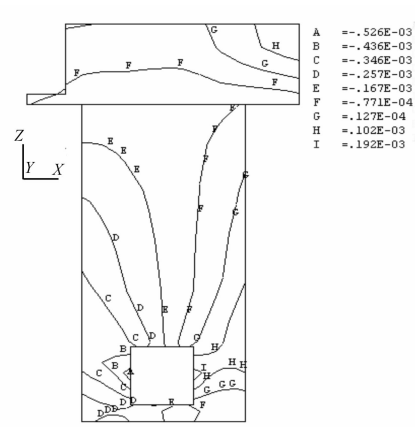


图 4 X 向位移

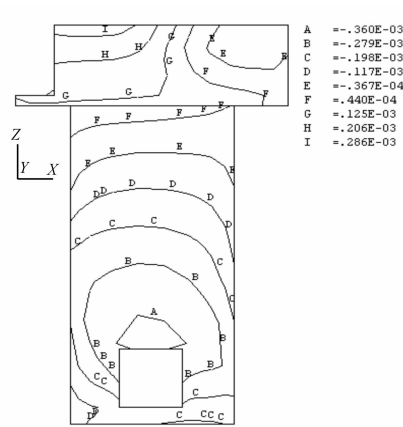


图 5 Y 向位移

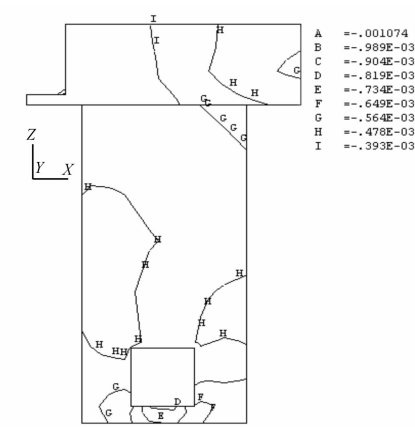


图 6 竖向位移

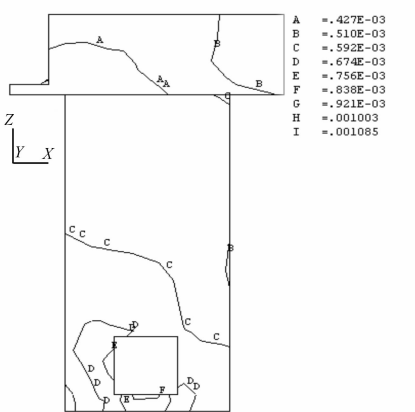


图 7 合位移

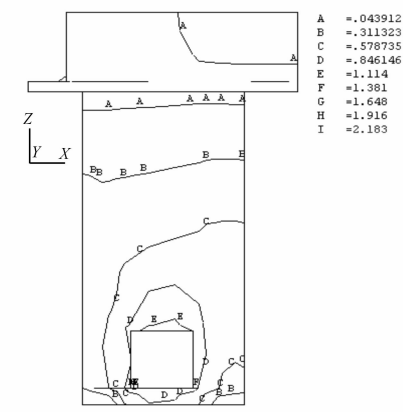


图 8 井筒外壁面第一主应力

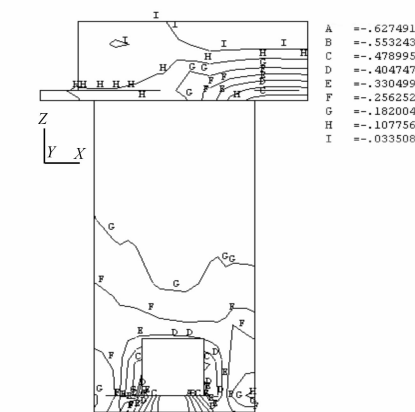


图 9 井筒外壁面第三主应力

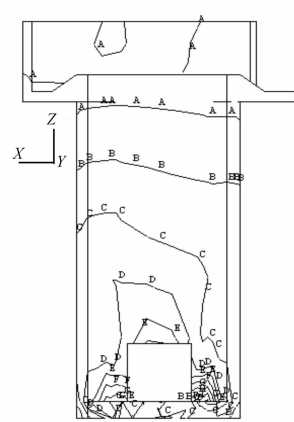


图 10 井筒内壁面第一主应力

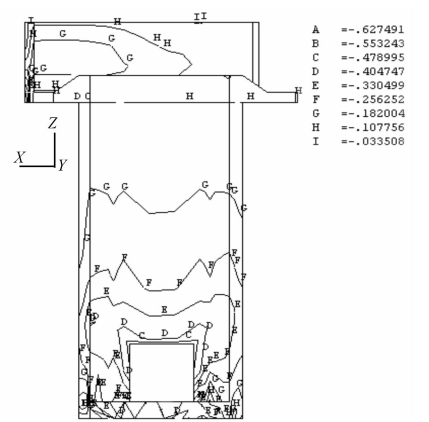


图 11 井筒内壁面第三主应力

相对较大。调压井底板应力为由板中心向外增大,在井筒与底板相接处,有应力集中,应力数值较大。底板中心处应力值为 0.01 MPa 左右,且为压应力。在板中心至井筒之间,除应力集中外,大多区域在 1.1 MPa 以内,在井筒与底板相接处,应力集中较为严重处,应力达到 1.5 MPa 以上,最大值在压力钢管开孔下缘点,达 2 MPa 以上。

4.3 线弹性有限元配筋计算

根据应力计算成果图得到调压井井筒不同高程的应力大小,按受力大小进行计算调压井配筋量,并根据裂缝计算公式,计算出了满足限裂要求 ($W_{max} = 0.25\text{ mm}$) 配筋,竖向应力均为压应力或很小的拉应力,构造配筋即可。整个截面配筋按双层配筋,当未考虑最小配筋率要求时,调压井各高程断面环向配筋结果见表 5。

表 5 调压井各高程环向配筋成果表

高程/m	第一主 应力/ MPa	第二主 应力/ MPa	强度配 筋面积/ (mm ² · m ⁻¹)	限裂配 筋面积/ (mm ² · m ⁻¹)
1090.0	0.40	-0.13	1546	3872
1085.0	0.48	-0.15	1984	4967
1075.0	0.58	-0.18	2512	5513
1065.0	0.85	-0.26	4012	8123
1057.5	0.58	-0.33	2512	5513

由表 5 可见配筋面积与应力分布规律一致,配筋面积自上而下逐渐增加,限裂钢筋的配筋量比强度配筋大。

5 非线性有限元法

5.1 基本原理与步骤

基于线弹性有限元法结果,对调压井结构进行了非线性有限元分析,岩体材料采用弹塑性本构关系,调压井和隧洞混凝土衬砌采用多线性弹性本构关系,并取组合破坏准则作为开裂准则,钢筋采用分布钢筋模式,线弹性材料。非线性有限元法对钢筋强度和混凝土开裂分析首先按最小配筋确定初始配筋量,然后根据非线性有限元法迭代分析的初始值,用非线性有限元法对初始配筋设计进行钢筋强度和混凝土裂缝宽度验算。非线性有限元法是先假定配筋按最小配筋率考虑,即整个截面配筋按 0.3% 考虑,井筒部分内外侧各配全截面的 0.15%,调压井结构壁厚 1.2 m,可考虑 2 排 $\phi 22@200$,其它部位截面配筋也按 0.3% 配筋。如果按最小配筋率计算

得到的钢筋应力或裂缝宽度超过规范要求,则应适当增加钢筋重新计算,直到满足要求为止。

5.2 混凝土开裂分析

从混凝土的开裂分布来看,在最高涌浪水压下,结构下部内外壁部分区域开裂,范围较小。主要集中在引水隧洞、压力管道、下室等与调压井井壁开孔处,以及调压井井壁与底板相接附近的井筒及底板内侧。压力钢管开孔下缘点局部区域混凝土裂穿。

5.3 应力计算分析

调压井应力集中在引水隧洞、压力管道、下室等与调压井井壁开孔处,以及调压井井壁与底板相接部位。

由于调压井衬砌开裂后部分内力重新分给围岩,因此非线性有限元法内力比线弹性有限元法内力减少。调压井本身的钢筋应力很小,钢筋应力大部分区域在 20 MPa 以内,局部达到 25 MPa,钢筋应力最大区域位于压力钢管开孔下缘点,达 27 MPa 左右。按最小配筋率进行非线性有限元法,调压井混凝土裂缝宽度为 0.054 mm,小于规范规定的 0.25 mm。

6 各种调压井内力计算对比

结构力学法采用薄壳与薄板理论进行计算,由于调压井衬砌所受荷载和围岩性质不明确,所以结构力学法难以精确,具有一定的误差。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,根据结构力学法的箍应力、弯矩对调压井结构进行强度配筋和限裂配筋。线性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,根据线性有限元法的应力图对调压井结构进行强度配筋和限裂配筋。线性有限元法限裂配筋在钢筋应力未达设计强度时而达至限裂上限,使用调压井结构配筋量较大。非线性有限元法基于线弹性有限元法结果,对调压井结构配筋合理进一步分析确定,由于非线性有限元法建立在合理的材料参数、结构模型和计算方法基础上,所以非线性有限元法选定调压井的结构为最优结构。

按结构力学法的箍应力、弯矩大小进行配筋,最大纵向强度配筋面积 7 016 mm²/m,最大纵向限裂配筋面积 8 500 mm²/m,最大环向强度配筋面积为 4 790 mm²/m,最大环向限裂配筋面积为 9 600 mm²/m。线性有限元计算竖向应力均为压应力或很小的拉应力,配筋按最小配筋率,配筋面积为 3 802 mm²/m。按线性有限元计算应力大小进行配

筋,最大环向应力配筋面积为 $4\,012\text{ mm}^2/\text{m}$,最大环向限裂配筋面积为 $8\,123\text{ mm}^2/\text{m}$ 。按非线性有限元法应力大小进行配筋,调压井本身的钢筋应力很小,配筋面积为 $3\,802\text{ mm}^2/\text{m}$ 。因此线性有限元计算比结构力学法得到的内力较小,配筋量小,非线性有限元法比线性有限元计算内力更小,配筋量更小。因此非线性有限元法使调压井配筋更经济和合理,精确反映结构实际受力情况,选定调压井的结构为最优结构。

7 结 语

(1)调压井井筒的内力自上而下逐渐增加,较大内力在井筒与底板相接处,最大内力压力钢管开孔下缘点。调压井底板的内力由板中心向外增大,较大弯矩在井筒与底板相接处。

(2)调压井应力集中在引水隧洞、压力管道、下室等与调压井井壁开孔处,以及调压井井壁与底板相接部位。

(3)线性有限元计算比结构力学法得到的内力较小,配筋量小,非线性有限元法比线性有限元计算内力更小,配筋量更小。因此非线性有限元法使调压井配筋更经济和合理,精确反映结构实际受力情况,选定调压井的结构为最优结构。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL655 - 2014 水利水电工程调压室设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 洪振国,刘浩林. 水电站调压井特征线法水力计算研究[J]. 中国农村水利水电,2013(4):113 - 115 + 117.
- [7] 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.
- [8] 洪振国,刘浩林. 水电站调压井特征线法水力计算研究[J]. 中国农村水利水电,2015(4):163 - 166.
- [9] 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.
- [10] 洪振国,刘浩林. 水电站阻抗式受力复杂调压井设计[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):148 - 153.
- [11] 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.