

水电站混合型调压井水力特性数值模拟研究

洪振国

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 混合型调压井水流流态复杂, 常规解析法和图解法均不能精确求出混合型调压井涌浪水位波动、压力差变化、调节保证变化等。基于数学模型进行混合型调压井水力特性数值模拟, 并通过模型试验验证数值模拟成果可靠性, 论证混合型调压井可行性。结果表明: 数值模拟和模型试验基本吻合, 数值模拟成果是可行的。调压井最高涌浪水位低于调压井顶高程, 最低涌浪水位大于需要最小淹没水深, 调压井底板受到的向上最大压力差较小, 水位波动经过上下往返运动, 波动不断减少, 最后稳定。机组转速、蜗壳和尾水管压力均在合理的范围内, 因此调压井底板高程和顶高程、阻抗孔口大小、稳定断面设计是合理的。

关键词: 混合型调压井; 数学模型; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TV732.51

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0162-06

Research on numerical simulation of hydraulic characteristics of mixed type surge shaft in hydropower station

HONG Zhenguo

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

Abstract: Because the flow regime of mixed type surge shaft was complicated, The conventional analytical method and graphical methods cannot accurately calculate its water level fluctuation, pressure difference changes, regulation guarantee change, etc. A numerical simulation of hydraulic characteristics of the mixed type surge shaft was conducted based on the mathematical model, the reliability of numerical simulation results were test by model test, and the feasibility of mixed type surge shaft was discussed. The results showed that, the numerical simulation agreed with model test results basically, and the numerical simulation results were feasible. The highest surge water level was below the top elevation of surge shaft, the lowest surge water level was higher than the required minimum submergence depth, bottom upward surge shaft by the maximum pressure difference was relatively small, the fluctuation of water level moved through the up and down reciprocating, the fluctuation decreased gradually, and finally stabilized. The turbine speed, the spiral case and the draft tube pressure were in reasonable ranges, therefore, the design of surge shaft bottom elevation and top elevation, size of stable impedance orifice and stabilized section was reasonable.

Key words: mixed type surge shaft; mathematical model; numerical simulation; model test

调压井结构布置往往受到地形、地质等条件的限制, 当基本类型调压井不能满足设计要求时, 则须要采用两种或两种以上基本类型调压井结合组成的混合型调压井^[1]。混合型调压井水流流态复杂, 常规的解析法和图解法不能精确求出混合型调压井涌浪水位波动、压力差变化、调节保证变化情况, 用数值模拟方法解决混合型调压井水力特性数值计算问

题的研究对工程设计具有重要的现实意义。本文以丹达水电站调压井为例, 基于数学模型进行混合型调压井水力特性数值模拟研究, 给出了混合型调压井在机组负荷变化时, 机组转速和水位波动等的变化过程^[2-3], 并通过水力模型试验对调压井水力特性数值进行了验证, 论证了混合型调压井顶高程、底高程、阻抗孔、稳定断面设计的可行性。

1 工程概况

丹达河水电站位于云南省迪庆州德钦县的羊拉乡,水电站设计发电引用流量 $33.5 \text{ m}^3/\text{s}$,装机容量 $2 \times 50 \text{ MW}$,多年平均发电量 $4.241 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}^{[4-6]}$ 。

丹达河水电站混合型调压井采用阻抗式和水室式调压井组成,即由阻抗孔、井筒、上室构成,调压井上游接引水隧洞,下游接压力管。调压井顶高程 $2\ 656.70 \text{ m}$,底板高程 $2\ 584.00 \text{ m}$,井筒高 $72.70 \text{ m}^{[7-9]}$ 。井筒为内径 7.0 m 圆形断面,阻抗孔口直径 2.0 m ,井筒衬砌厚度 1.0 m ,底板衬砌厚度 1.5 m 。上室断面为城门洞形,上室与井筒接口处高程 $2\ 648.10 \text{ m}$,尺寸 $5 \text{ m} \times (5.25 \sim 6.4)/2 \text{ m} \times 115 \text{ m}$,底坡 1% ,容积 $2\ 774 \text{ m}^3$,该水电站混合型调压井纵剖面图见图 1。

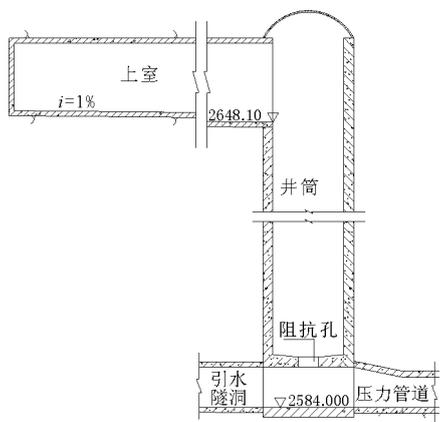


图 1 丹达河水电站混合型调压井纵剖面图

2 研究方法

混合型调压井由水室式和阻抗孔式调压井组合,可以充分利用交通洞,将其扩大改造为上室,供丢弃负荷时储水之用,而阻抗孔减小了水位波动振幅,混合型调压井具有水位波动最小、高度最小、工程量最小和实用价值较高的特点,因此对混合型调压井水力特性数值模拟方法进行研究是必要的。

根据引水发电系统水力过渡过程计算原理,建立引水发电系统整体数学模型,数学模型包括进水口、引水隧洞、调压井、压力主管和支管、水轮发电机组和调速器。将水轮机模型综合特性曲线以离散数据点的形式储存于计算机中,对引水发电系统各管段进行分段处理,基于数学模型进行水电站调压井水力特性数值模拟^[10-12]。

2.1 方程

水流的动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{cv |v|}{2D} = 0 \quad (1)$$

水流的连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: v 为压力水道中的流速, m/s ; H 为测压管水头, m ; x 为从管段左端起算的距离, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为管径, m ; c 为摩擦系数; a 为水击波在管道中的传播速度, m/s ; t 为时间, s 。

由方程(1)、(2)可得特征线方程如下:

正向波特征线方程:

$$H_p = C_1 - BQ_p \quad (3)$$

反向波特征线方程:

$$H_p = C_2 + BQ_p \quad (4)$$

式中: H_p 为管道内第 i 断面 $t + \Delta t$ 时刻的测压管水头, m ; C_1 、 C_2 分别为与 $t + \Delta t$ 时刻的压力水头和流量有关的参数; B 为与管道断面有关的参数; Q_p 为 P 点在 $t + \Delta t$ 时刻的流量, m^3/s 。

考虑进水口局部水头损失时,上游边界方程为:

$$H_p = H_{R1} - \frac{(1 + k_1)}{2gA^2} Q_{p1}^2 \quad (5)$$

$$C - : H_p = C_M + B_1 Q_{p1} \quad (6)$$

式中:下标 1 表示隧洞的参量; k_1 为进口损失系数; B_1 为与隧洞断面有关的参数; A 为隧洞断面面积, m^2 ; H_{R1} 和 Q_{p1} 为上游边界节点的压头和流量, m 、 m^3/s ; C_M 为与 $t - \Delta t$ 时刻的压头和流量有关的参数,对 t 时刻是已知量。

考虑尾水管出口局部水头损失时,下游河道边界方程为:

$$H_p = H_{R2} - \frac{(1 + k_2)}{2gA^2} Q_{p2}^2 \quad (7)$$

$$C + : H_p = C_{ps} - B_2 Q_{p2} \quad (8)$$

式中:下标 2 表示尾水管的参量; k_2 为出口损失系数; B_2 为与尾水管断面有关的参数; C_{ps} 为分别与 $t - \Delta t$ 时刻的压头和流量有关的参数; H_{R2} 和 Q_{p2} 为尾水管出口节点的压头和流量, m 、 m^3/s 。

2.2 数学模型

水库死水位 $2\ 625.00 \text{ m}$,正常蓄水位 $2\ 647.00 \text{ m}$,校核水位 $2\ 648.10 \text{ m}$ 。校核洪水尾水位 $2\ 269.43 \text{ m}$,设计尾水位 $2\ 258.80 \text{ m}$ 。引水隧洞上游接取水口,下游连接调压井,引水隧洞设计流量 $33.5 \text{ m}^3/\text{s}$,底坡 2.726% ,全长 $10\ 092.88 \text{ m}$ 。引水隧洞衬砌形式如下几种:A 型钢筋混凝土支护占引水隧洞总长的 41.6% ;B 型喷锚支护占引水隧洞总长的

27.7% ;C型钢筋混凝土支护占引水隧洞总长的30.7%。调压井筒高72.7 m,调压井井筒内径7.0 m,阻抗孔口直径2.0 m,调压井下游连接压力管道,压力管道的主管道长670.3 m,管径3.0 m,主管接两条支管,1#发电机支管长19.8 m,直径2.0 m,2#发电机支管26.3 m,直径1.5 m,引水发电系统数学模型示意图见图2。

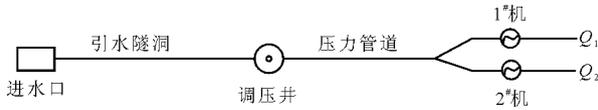


图2 引水发电系统数学模型示意图

3 数值模拟结果与分析

3.1 弃负荷水位波动和压力差变化

水库正常蓄水位2 647.00 m,两台机组丢弃全部负荷时,通过数值模拟得到了弃负荷调压井水位波动过程图3和阻抗孔口附近底板压力差变化过程图4。

从图3可知:当机组2台 \rightarrow 0丢弃负荷时,0~10s调压井水位按直线上升,水位从2 630.0 m升至2 649.0 m高程;10~200 s按曲线向上运动,水位从2 649.0 m到2 652.0 m高程;200~580 s,水位从2 652.0 m高程下降至2 636.0 m高程;然后水位上下往返波动2.5次,水位波动不断衰减,至1 630 s

后水位稳定。

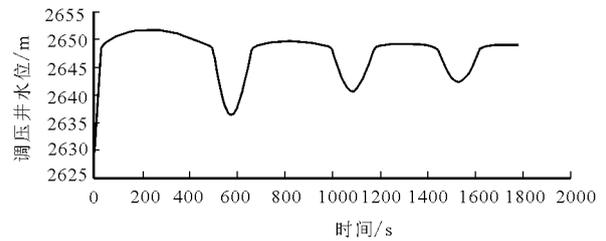


图3 弃负荷调压井水位波动过程

图4表明,当机组2台 \rightarrow 0丢弃负荷时,0~2s调压井阻抗孔口附近底板压力差按直线上升,压力差从0 m迅速升至13 m,压力差升至最高;2~500 s调压井底板上下压力差降至-1 m,压力差降至最低;然后经过4次往返运动,压力差不断减小;到1 800 s后,调压井底板上下压力差为0 m。

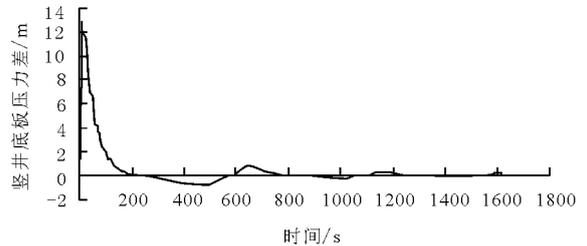


图4 弃负荷调压井阻抗孔口附近底板压力差变化过程

当水库不同水位弃负荷各种工况时,通过数值模拟得到相应的水位波动和底板压力差变化成果见表1。

表1 弃负荷各种工况调压井水位波动和底板压力差变化成果

水库水位/m	工况	最高涌波水位/m	最高涌波发生时间/s	最低涌波水位/m	最低涌波发生时间/s	底板最大压力差/m	底板最大压力差发生时间/s
2647.0	2台 \rightarrow 0	2652.0	250	2636.0	580	13	2
	1台 \rightarrow 0	2650.8	250	2639.7	620	6	250
2648.1	2台 \rightarrow 0	2652.5	300	2639.0	650	14	2
	1台 \rightarrow 0	2646.2	300	2640.7	680	8	300
2625.0	2台 \rightarrow 0	2648.5	100	2608.7	266	2	2
	1台 \rightarrow 0	2647.3	100	2612.4	320	1	100

从表1表明:(1)上游水库校核水位、2台机组丢弃全部负荷时,流入调压井流量最大,调压井最高涌波水位2 652.5 m,在各种工况中,此工况水位最高,因此该工况为控制工况。(2)当丢弃负荷时,水位上升受到上室限制,上升的速度便立即缓慢下来,涌波水位不高。(3)调压井底板受到的向上最大压力差为14 m。

综合以上弃负荷水位波动和压力差变化分析,

得到调压井最高涌波水位2 652.5 m低于调压井顶高程2 656.70 m,调压井顶高程是合理的。调压井底板(阻抗孔口附近)受到的向上最大压力差较小,调压阻抗孔口大小适宜。调压井水位上下往返波动不断衰减,压力差不断减小,初步认为调压井稳定断面可行,但是调压井稳定断面面积与蜗壳和尾水管压力机组转速、水轮机效率以及水轮机调速器的参数等有关,调压井稳定断面还需要调节保证成果进

一步复核。

3.2 增加负荷水位波动和压力差变化

当水库各种水位机组增加负荷各种工况时,通过数值模拟得到调压井水位迅速下降至最低,底板上面压力大于下面的压力,产生方向向下的最大的

压力差;然后水位从最低上升至最高水位,调压井底板下面压力大于上面的压力,产生方向向上的压力差;经过上下往返波动,水位波动不断衰减,最后水位稳定,调压井底板上下压力相等,调压井水位波动及底板压差数值模拟成果见表 2。

表 2 增加负荷各种工况调压井水位波动和底板压力差变化成果

水库水位/m	工况	最低涌波水位/m	最低涌波发生时间/s	最高涌波水位/m	最高涌波发生时间/s	底板最大压力差/m	底板最大压力差发生时间/s
2648.1	0 台→1	2624.3	110	2650.4	320	1.7	2
	1 台→2	2622.4	110	2646.3	320	1.0	110
	0 台→2	2608.3	110	2649.7	320	3.8	110
2647.0	0 台→1	2623.5	90	2649.9	300	1.8	2
	1 台→2	2621.7	90	2645.9	300	1.2	90
	0 台→2	2607.4	90	2649.0	300	4.5	90
2625.0	0 台→1	2606.0	70	2634.0	180	2.1	2
	1 台→2	2603.5	70	2627.0	220	1.5	70
	0 台→2	2586.1	70	2632.0	250	5.6	70

从表 2 表明:(1)水库死水位 2 625.00m、2 台机组同时增加最大负荷时,调压井最低涌浪水位 2 586.1 m,在各种工况中,此工况水位最低,因此该工况为控制工况。(2)水库水位 2 625.00 m 两台机同时增加最大负荷时,调压井淹没水深为 2.1 m,其余增负荷组合方式的最低涌波水位远超 2.1 m。

根据以上增加负荷水位波动和压力差变化分析,得到调压井最低涌浪水位 2 586.1 m 比底板高程 2 584.00 m 高 2.1 m,满足调压井最小淹没水深大于 2 m 的规范要求,因此调压井底板高程是合适的。

3.3 调压井调节保证

当上游水库正常蓄水位 2 647.0 m、2 台机组同时丢弃全部负荷时,通过数值模拟得到蜗壳压力变化过程图 5、机组转速变化过程图 6、尾水管压力变化过程图 7。

强的作用,0~2 s 蜗壳压力从 360 m 按直线升高至 422.0 m,2~4s 蜗壳压力为 422.0 m,4~6 s 蜗壳压力从 422.0 m 降至 408.0 m,6~8 s 蜗壳压力从 408.0 m 升高至最大压力 438.155 m,8~10 s 蜗壳压力从 438.155 m 降低至 382.0 m,然后 10~12 s 蜗壳压力从 382.0 m 升至 400.0 m,经过向上下波动 25 s 以后蜗壳压力约为 404.0 m。由于蜗壳最大压力 438.155 m,相对额定水头 350.0 m 升高 25.19%,相对最大静压力 395.8 m 升高 10.70%。

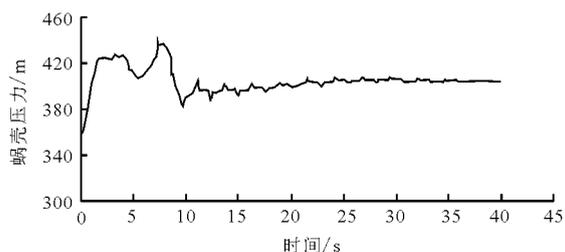


图 5 蜗壳压力变化过程

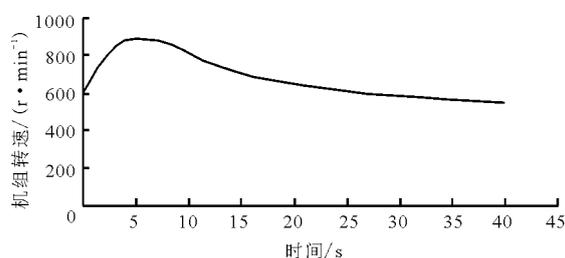


图 6 机组转速变化过程

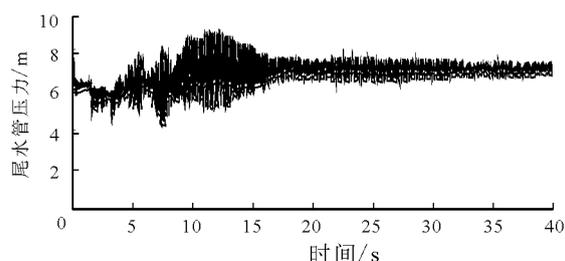


图 7 尾水管压力变化过程

图 5 表明:由于水力发电系统内产生的水击压

图6表明:0~5 s 机组转速从600升至最大转速887.752 r/min,5~40 s 转速从887.752降至550 r/min,40 s后机组运行稳定,转速保持550 r/min。由于机组容量占电力系统工作总容量的比重不大,不担负调频任务,机组丢弃负荷时的最大转速为887.752 r/min,转速最大上升率 $\beta_{\max} = 47.96\%$ 。

由图7可知:0~0.5 s 尾水管压力从6.0 m迅速升至7.5 m,0.5~2 s 尾水管压力从7.5 m迅速

降至5.5 m,经过几次上下变化过程,7.5 s时尾水管压力最小,压力为4.552 m,11.5 s时尾水管压力最大,压力为9.0 m,然后尾水管压力随时间波动,到21 s后尾水管压力基本稳定,压力为7.0 m。

水库正常蓄水位2647.0 m、最高发电水位2648.1 m、死水位2625.0 m,2台机组同时丢弃全部负荷,通过数值模拟得到水轮机导叶各种关闭时间调节保证成果见表3。

表3 2台机组同时丢弃负荷水轮机导叶各种关闭时间调节保证成果

水库水位/m	关闭时间/s	转动惯量/ ($t \cdot m^2$)	最大转速升高率 $\beta_{\max}/\%$	最大转速 $n_{\max}/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	压力升高 $\zeta_{\max}/\%$	蜗壳水锤 压力/m	尾水管最低 压力/m
2647.0	8	300	45.81	874.865	28.15	448.512	4.890
	9	300	46.86	881.139	26.33	442.167	4.022
	10	300	47.96	887.752	25.19	438.155	4.552
2648.1	9	300	46.80	880.826	26.75	443.626	5.120
	10	300	47.86	887.134	25.32	438.632	4.645
2625.0	9	300	44.13	864.791	19.45	418.077	4.519
	10	300	45.18	871.079	18.57	414.987	3.329

从表3可知:(1)导叶关闭时间越快,转速升高越小,但蜗壳水锤压力越大,因而控制转速升高和水击压强上升两者之间是矛盾的,转速升高过大,会影响发电机寿命和供电质量,压力过大会增加水力系统的投资并恶化机组调节品质,因此设计中必须对两者加以限制,满足规范的要求,达到安全可靠、经济合理的设计目的,(2)2台机组丢弃额定负荷后的蜗壳最大压力438.632 m,相对额定水头350.0 m升高25.32%,相对最大静压力395.8 m升高10.82%;机组最大转速为887.752 r/min,最大转速升47.96%不超过60%;尾水管最低压力3.329 m大于-8.0m。(3)机组额定容量50MW,额定转速600 r/min,根据目前阶段的机组设计制造水平,发电机转动惯量值可以达到300 $t \cdot m^2$ 。

通过以上压力差变化、机组转速、蜗壳和尾水管压力的变化过程分析,水轮机导叶关闭时间10 s时,2台机组同时丢弃额定负荷后的蜗壳最大压力438.632 m,小于控制标准455 m,具有良好的机组调节品质^[13]。机组最大转速升高值887.752 r/min,相对额定转速上升率47.86%,小于控制标准60%,因此机组转速上升值在经济合理的范围内,水电站运行安全可靠且经济合理。尾水管最小压力3.329 m大于-8.0 m,尾水管最小压力满足《水力发电厂机电设计技术规范》要求。

4 调压井水力模型试验

4.1 水力模型设计

整体引水系统模型试验设计采用变态模型,经过调整,丹达河水电站引水发电系统整体模型设计各主要参数比尺(原型:模型)如下:调压井高度比尺为42.30,引水隧洞长度、直径、流速比尺分别为30.29、82.47、6.50,压力钢管直径比尺为42.30,时间比尺为12.69,流量比尺为5967.17。

模型引水隧洞长度达122.38m,调压井水位由压力传感器测量,经动态应变仪后由计算机采集数据并处理绘出水位波动过程。

4.2 水力模型试验成果

经过水力模型试验,当弃负荷或增加负荷时,水位经过上下往返波动,水位波动不断衰减,最后水位稳定,水位运动规律与数值模拟基本吻合,表4为上游水库在不同水位下各工况时调压井涌波水位模型试验成果。

表4 调压井涌波水位模型试验成果

库水位/m	机组运行工况	最低涌波 水位/m	最高涌波 水位/m
2648.1	2台→0	2639.0	2652.5
2647.0	2台→0	2636.0	2652.0
2625.0	0台→1台	2606.0	2634.0
2625.0	1台→2台	2603.5	2627.0

5 数值模拟与水力模型试验比较

表5为涌波水位数值模拟值与模型试验值的结果比较。

表5 调压井涌浪水位数值模拟值与模型试验值比较

库水位/ m	机组运行 工况	涌波水位数值 模拟值/m		涌波水位 试验值/m	
		最低	最高	最低	最高
2 648.1	2台→0	2639.0	2652.5	2639.3	2652.9
2 647.0	2台→0	2636.0	2652.0	2636.4	2652.5
2 625.0	0台→1台	2606.0	2634.0	2606.4	2634.3
2 625.0	1台→2台	2603.5	2627.0	2603.7	2627.2

从表5表明:(1)调压井模型试验的涌波水位与数值模拟值十分接近,基于数学模型进行混合型调压井水力特性数值模拟是可行的;(2)调压井最低涌波水位高于调压井底板高程,最高涌波水位低于调压井顶高程,因此调压井稳定断面、底板高程和顶高程是合适的。

6 结论

(1)调压井最低涌波水位满足调压井最小淹没水深大于2 m的规范要求,最高涌波水位低于调压井顶高程,调压井底板受到的向上最大压力差较小,各种工况机组丢弃负荷或增加负荷时,调压井水位上下往返波动几次,水位波动不断衰减。同时蜗壳最大压力和机组相对额定转速上升率小于控制标准,尾水管最小压力大于控制要求,水电站机组转速上升值在经济合理的范围内,水电站运行安全可靠且经济合理,机组具有较好的动态品质和稳定性。因此调压井底板高程和顶高程、阻抗孔口大小、稳定断面的设计是合理的。

(2)数值模拟和模型试验结果基本吻合,采用

数学模型进行混合型调压井水力特性数值模拟是可行的。今后还应进一步研究各种计算方法进行调压井的水力学计算,设计更经济安全的新型调压井。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL 655 - 2014 水利水电工程调压室设计规范[S]. 北京:中国水利电力出版社, 2014.
- [2] 王仁坤,张春生. 水电水利规划设计总院. 水工设计手册(水电站建筑物)[M]. 北京:中国水利电力出版社, 2013.
- [3] 潘家铮,傅华. 水工隧洞和调压室(调压室部分)[M]. 北京:水利水电出版社,1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 陈玲,鞠小明,杨济铨. 水电站调压室涌浪水位多种计算方法比较[J]. 中国农村水利水电,2013(9):158-161.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 水利水电规划设计总院. DL/T 5186 - 2004 水力发电厂机电设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2004.