

水室与溢流相结合的新型调压井水力学计算研究

洪振国, 李建伟, 苟勤章

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 目前对水室与溢流相结合的新型调压井研究较少,水室和溢流相结合的新型调压井通过溢流堰溢流和水室补水,能有效降低调压井高度,因此有必要对水室和溢流相结合的新型调压井进行研究。水室和溢流相结合的新型调压井结构复杂,调压井水力学计算是该新型调压井研究的重要课题。以腊寨水电站水室与溢流相结合的新型调压井为例,通过水电站引水系统建立数学模型,完整地考虑了系统各环节非线性因素的影响以及上游水库、分叉管路、调压井、水轮机等边界条件,利用特征线方法进行管道水击计算,托马公式进行调压井稳定断面计算。结果表明:机组负荷突然发生变化时,机组转速随之变化,调压井水位上下波动不断衰减,最终水位稳定。机组转速、蜗壳和尾水管压力满足规范要求,达到了经济、安全、可靠的目的,机组的调节最大偏差小、时间短、振荡次数少,动态品质指标较好。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,满足调压井不掺气和漫顶的要求,因此调压井体型设计合理,水电站运行安全。

关键词: 水电站; 调压井; 水力学计算; 数学模型法

中图分类号:TV732.5

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)03-0165-05

Hydraulics calculation of new surge tank combining water chamber with overflow

HONG Zhenguo, LI Jianwei, GOU Qinzhang

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

Abstract: At present, few scholars have studied the new surge well that combining water chamber with overflow, which can effectively reduce the height of surge well by overflow weir and water chamber. Therefore, it is necessary to conduct more studies on this type of new surge well. Hydraulic calculation of the new surge wells is an important subject due to the complex calculations. Taking the new surge tank of Lazhai Hydropower Station as an example, this paper establishes a mathematical model through the diversion system of the hydropower station. The influence of non-linear factors in each link of the system is fully considered. The boundary conditions of upstream reservoirs, bifurcated pipelines, surge wells and hydraulic turbines are also taken into account. The pipeline water hammer calculation is carried out by the method of collecting lines. The Toma formula is used to calculate the stable section of surge shaft. The results showed that when the unit load suddenly changes, the unit speed changes accordingly, the fluctuation of surge well water level decreases continuously, and the final water level is stable. In addition, the speed, volute and draft tube pressure of the unit meet the requirements of specifications and reach the economic and safe and reliable range. The maximum adjustment deviation of the unit is small, the time is short, the number of oscillations is small, and the dynamic quality index is good. The lowest surge water level of surge wells is higher than the bottom elevation of surge wells, and the highest surge water level of surge wells is lower than the top elevation of surge wells, which meets the requirements of no aeration and overtopping of surge wells. Therefore, the shape design of the new surge wells is reasonable and the hydropower station operates safely.

Key words: hydropower station; surge shaft; hydraulics calculation; mathematical model method

收稿日期:2018-08-23; 修回日期:2018-11-11

作者简介:洪振国(1976-),男,云南洱源人,高级工程师,主要从事水工建筑物设计。

1 研究背景

调压井具有较大自由水面,可以缩短压力管道长度、减少水流惯性,充分反射水击波,减小水击压强,是水电站工程中最常用、最可靠的调压设施^[1]。目前随着水电站的大量开发,调压井布置地形地质条件往往较为复杂,基本类型调压井已不能满足工程需求。有些学者对几种基本类型相结合的调压井进行研究,例如史海英等^[2]采用阻抗与溢流相结合的调压井解决了调压井所在山体高程低于大坝正常蓄水位产生的结构问题。李洪春等^[3]采用阻抗式和上室式结合调压井解决了调压井施工难度大、开挖量大等问题。洪振国等^[4]采用水室式和阻抗孔式调压井结合调压井有效地降低调压井高度,但是很少有学者对水室与溢流相结合的调压井进行研究。由于水室和溢流相结合的新型调压井通过溢流堰溢流和水室补水,限制了涌波水位上升和水位继续下降,水位波动幅度小,从而有效地降低调压井高度,因此有必要对水室和溢流相结合的新型调压井进行研究^[5]。水室和溢流相结合的新型调压井结构复杂,调压井水力学计算是该调压井研究的重要课题,水力学计算难度在于如何建立数学模型、确定水击方程和边界条件。

调压井水力学计算主要有解析法和数学模型法两种计算方法,解析法主要用于求解不计水击影响的基本类型调压井涌波问题,计算调压井最高水位和最低水位比较简便,但有时计算精度较差,不能计算调压井波动水位全过程。水室和溢流相结合的新型调压井边界条件复杂,有可能存在下列情况:(1)调压井对水击波的反射不够充分;(2)压重的水位波动周期与水轮机导叶的启闭时间相差不大。因此解析法不能进行这一新型调压井水力学计算^[6-9]。

数学模型法根据水电站引水系统建立数学模型,完整地考虑了系统各环节非线性因素的影响以及上游水库、分叉管路、调压井、水轮机等边界条件,利用特征线方法进行管道水击计算,采用托马公式进行调压井稳定断面的计算。通过对调压井涌波和水击的联合计算来确定调压井的涌波水位过程线及涌波水位极值,同时可以计算调压井涌波、水击压强和机组转速上升率、机组特性、调速器参数和电网的影响等。

本文以腊寨水电站水室与溢流相结合的新型调压井为例,采用数学模型法进行调压井水力学计算,全面系统地分析调压井最高、最低水位、水位随时

间波动的全过程、小波动稳定性、调节保证情况,论证水电站调压井的体型设计的合理性、水电站运行的安全性。

2 工程概况

腊寨水电站位于保山市龙江下游河段,为龙江—瑞丽江干流第九级开发水电站,水电站开发任务以发电为单一目标。水库正常蓄水位 1 102.5 m,总库容 $613.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,电站总装机容量 120 MW,年发电量 $6.07 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,年利用小时 5 058 h。水电站首部枢纽由大坝和泄洪冲沙洞组成,大坝为混凝土重力坝,坝顶高程 1 105.0 m,建基面最低高程 1 037.0 m,坝顶总长度 180.5 m,大坝最大坝高 68 m,坝底最大宽度 54.5 m,共设 9 个坝段。泄洪冲沙洞布置在左岸,为压力圆洞^[10-13],洞径 8 m,总长 418.29 m。引水发电隧洞总长 2 057 m,洞径 8 m,进口底板高程 1 070.0 m,引水发电隧洞设计流量 $240.0 \text{ m}^3/\text{s}$,底坡 $i = 6.08\%$,压力钢管长 75.11 m,管径 $D = 7500 \text{ mm}$ 。

调压井布置在突出山脊上,地形较陡,山体由变粒岩、混合岩等构成,邻河面卸荷严重,卸荷带深度达 20~30 m,开挖边坡较低,开挖边坡稳定性差。井口内侧开挖边坡高,逆向坡,开挖边坡基本稳定。调压井上部围岩为弱微风化岩,岩体完整性差。调压井下部围岩为微风化岩,岩体完整性好,岩石强度高,承载能力高。调压井利用山脊天然冲沟改造为泄水道^[14-16],利用地勘探洞改造为下室,调压井采用水室和溢流相结合的新型调压井,压力钢管轴线与引水发电隧洞轴线的空间交角为零,调压井平面图见图 1,纵剖面图见图 2。

调压井底板高程 1 057.5 m,井高 51.4 m,井筒直径 17.5 m, C25 混凝土衬砌,厚 1.2 m。下室长 100 m,直径由 9 m 渐变为 5.941 m。泄水道全长 113.12 m,底宽由 10 m 渐变为 8 m。泄水道全长 113.12 m,底宽由 10 m 渐变为 8 m。

水室与溢流相结合的新型调压井由泄水道、溢流堰、井筒、下室构成,与常规的调压井相比其结构较为复杂。水室与溢流相结合的新型调压井综合了水室式调压井和溢流式调压井优点,当丢弃负荷时,通过溢流堰溢流,限制了涌波水位上升;在增加负荷时,通过下室补充不足的水量,有效地限制水位继续下降。水室和溢流相结合的新型调压井的水位波动幅度小,有效地降低调压井高度,避开卸荷带,保证水电站的安全运行。

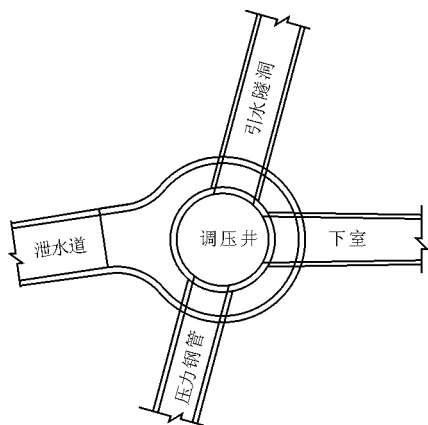


图 1 调压井平面图

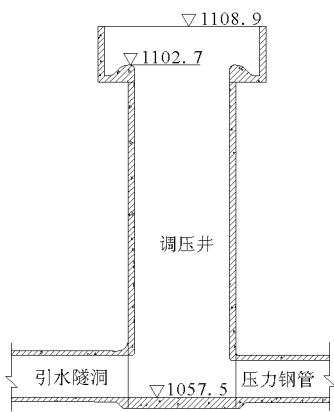


图 2 调压井纵剖面图

3 调压井水力学计算

调压井水力学计算采用数学模型法进行调压井水力学计算,通过水电站引水系统建立数学模型,完整地考虑了系统各环节非线性因素的影响^[17-19]以及上游水库、分叉管路、调压井、水轮机等边界条件。分别采用特征线法和托马公式进行管道水击方程计算和调压井稳定断面计算。其中水击方程包括:引水发电隧洞、压力钢管、发电厂房的蜗壳和尾水管。

通过调压井水力学计算,分析导叶关闭、开启的合理规律以及机组甩负荷和增负荷的水力过渡过程,且得到管道最大、最小水压力的沿程分布规律,特别是调压井的最高、最低水位等。

3.1 数学模型

引水发电隧洞全长 2 057 m,断面呈圆型,衬砌后洞径 8.0 m,开挖洞径 9.0 m。隧洞糙率:混凝土支护糙率为 0.012~0.016,平均糙率为 0.014;喷混凝土支护糙率为 0.022~0.030,平均糙率为 0.028。调压井高 51.4 m,直径为 $D = 17.5$ m,底板高程 1 057.5 m,顶高程为 1 108.9 m,下室长 100 m,压力

钢管长 75.11 m,管径 $D = 7\ 500$ mm,支管管径 $D = 4\ 200$ mm,支管总长 39 m。

水库特征水位如下:死水位 1 090.0 m,正常水位 1 102.5 m,设计洪水位 1 103.42 m,校核洪水位 1 103.67 m;尾水特征水位最低尾水位 1 020.48 m,设计洪水位 1 027.06 m,校核洪水位 1 028.01 m,水轮机型号为 HLA743-LJ-312。机组特征参数为:额定效率 92.32%,额定流量 $76.92\ \text{m}^3/\text{s}$,转轮直径 3 120 mm,额定转速 200 rpm,转动惯量 $3\ 100\ \text{t} \cdot \text{m}^2$ 。

由引水发电隧洞、调压井、压力钢管、发电厂房的蜗壳和尾水管等组成水电站引水系统,水电站引水系统如图 3 所示。

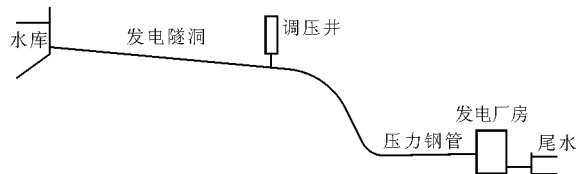


图 3 水电站引水系统示意图

3.2 稳定断面计算方程

调压井稳定断面采用托马公式计算:

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

式中: F 为水电站调压井稳定断面面积, m^2 ; L 为从调压井至上游水库的引水发电隧洞长度, m ; K 为系数; f 为引水发电隧洞的断面面积, m^2 ; H_0 为水电站上、下游的最小水位差, m ; α 为引水发电隧洞的水头损失系数; h_{w0} 为引水发电隧洞水头损失, m ; h_{wm} 为压力钢管水头损失, m 。

3.3 管道水击方程

管路中的水力瞬变可由下述偏微分方程描述:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{A}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f|Q|Q}{2gdA^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2 A}{g} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

式中: H 为测压管水头, m ; Q 为管路流量, m^3/s ; A 为管路断面面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为达西沿程水力损失系数; t 为时间, s ; α 为水击波速, m/s ; d 为管路直径, m 。

水电站管道水击波速一般在 1 000 ~ 1 400 m/s 之间变化,上述一对偏微分方程可转化下述有限差分方程:

$$C^+ \quad H_{pi} = C_p - B_p Q_{pi} \quad (4)$$

$$C^- \quad H_{pi} = C_m + B_m Q_{pi} \quad (5)$$

式中: C_p 、 C_m 、 B_p 、 B_m 为时刻 $t = -\Delta t$ 的已知量。

当给定管路两端的边界条件时,时刻 t 计算断面 i 的流量 Q_{pi} 和水头 H_{pi} 通过公式(4)和(5)联合求解得到。

3.4 边界条件

水力瞬变计算的边界条件包括:上游水库、分叉连接管路、调压井、水轮机等,边界条件的计算方法如下。

3.4.1 上游水库 调速系统瞬间变化率比水库水位的变化率较大,水库水位的变化率可以忽略不计,可以认为上游水库水位为常数,即:

$$H_{p1} = H_{res} = \text{常数} \quad (6)$$

式中: H_{p1} 为 t 时刻引水发电隧洞进口水头, m; H_{res} 为上游水库水位, m。

3.4.2 分叉管路 通过分叉连接管路,在分叉连接处没有储存容积,即 $\sum Q_p = 0$ 。当局部水力损失忽略不计时,每管子的相容性方程。

3.4.3 调压井 调压井水位与流量的关系为:

$$\frac{dH_s}{dt} = \frac{Q_s - Q_y}{A_s} \quad (7)$$

式中: Q_s 为流出或流入调压井的流量, m^3/s ; H_s 为调压井水位, m; A_s 为调压井断面面积, m^2 ; Q_y 为调压井顶溢流流量, m^3/s 。

调压井中的水流惯性和水力损失与引水发电隧洞的相比可忽略不计,调压井底部测压管水头近似等于调压井水位与底部水头损失之和。

调压井底部水流连续性条件是:

$$Q_s = Q_T - Q \quad (8)$$

式中: Q_T 为引水发电隧洞出口流量, m^3/s ; Q 为压力钢管进口流量, m^3/s 。

Q_T 和 Q 与调压井水位的关系由相容性方程:

$$C^+ \quad Q_T = -\frac{H_p}{B_{pT}} + \frac{C_{pT}}{B_{pT}} \quad (9)$$

$$C^- \quad Q = \frac{H_p}{B_m} - \frac{C_m}{B_m} \quad (10)$$

调压井顶溢流流量的计算公式为:

$$Q_y = \mu B_y \sqrt{2gH_0}^{3/2} \quad (11)$$

式中: μ 为流量系数; B_y 为溢流堰的宽度, m。

3.4.4 水轮机 机组负荷突然发生变化时,机组转速随之变化,在调速器调节作用下,水轮机导叶开度变化,引起引水系统水力突然变化。机组转动方程和水头平衡方程称为水轮机的边界条件。

机组转动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_g \quad (12)$$

式中: J 为水体附加和机组转动部分的转动惯量,通常以机组的飞轮力矩 GD^2 表示; $d\omega/dt$ 为角加速度; M_g 为发电机电磁转矩; M 为水轮机的轴力矩。

水头平衡方程为:

$$H = \left(H_1 + \frac{|Q|Q}{2gA_1^2} \right) - \left(H_2 + \frac{|Q|Q}{2gA_2^2} \right) \quad (13)$$

式中: H 为水轮机水头, m; H_1 为压力钢管出口水头, m; H_2 为尾水管出口水头, m; A_1 为压力钢管出口面积, m^2 ; A_2 为发电厂房尾水管出口面积, m^2 。

在压力钢管末端,沿 C_p 的相容性方程为:

$$H_1 = C_p - B_p Q \quad (14)$$

出水管进口沿 C_M 的相容性方程为:

$$H_2 = C_M + B_M Q \quad (15)$$

3.5 计算结果分析

3.5.1 稳定断面结果分析 上游水库到调压井的引水发电隧洞的长度 $L = 2056.682$ m,水电站上、下游的最小水位差 $H_0 = 56.84$ m,引水发电隧洞的断面面积 $f = 44.156$ m^2 ,根据上面托马公式计算,调压井稳定断面面积 $F = 240$ m^2 ,直径为 17.5 m。调压井稳定断面与水轮机效率、调速器等参数有关,需要进一步计算复核^[20-23]。

3.5.2 机组甩负荷计算结果分析 水轮机导叶关闭规律采用直线关机,调速器 100% 开度设定关机时间 7 s,在机组突然丢弃负荷各种工况下,机组转速随之变化,调压井水位上下波动不断衰减,最终水位稳定。在 3 台机组同时甩负荷条件下,调压井最高涌波水位 1106.90 m,发生在水库校核洪水位,小于调压井顶高程为 1108.9 m,井顶高程是合适的。在水库死水位下水轮机最大转速上升,最大转速为 299.4 rpm,上升率为 40%,上升率小于规范控制标准 60%。在水库校核洪水位下蜗壳压力上升,压力上升率为 28%,最大压力为 99.5 m 大于 -8.0 m,尾水管压力满足规范要求^[24-25]。上述计算结果均满足规范要求,达到安全可靠、经济合理范围,调压井体型设计是合理的,水电站运行是安全的。

3.5.3 机组增负荷计算结果分析 导叶开启规律是线形开启,即在 10.0 s 内导叶开度相对值从完全关闭 $y = 0$ 线性开启到全开 $y = 1$ 。在机组突然增加负荷各种工况下,可得下述结论:

(1) 蜗壳水压降低率大于 -0.19,最小水压为 57.2 m 水头,发生在 3 台机组同时从空载增满负荷。

(2) 3 台机组同时从空载增满负荷,调压井最低

涌波水位 1069.5 m 大于调压井底板高程 1 057.5 m,不会发生调压井漏空的现象,满足设计要求。

(3)水轮机上游引水系统中最小水压均大于 15 m 水头,满足设计要求。

(4)压力钢管轴线与引水发电隧洞轴线的空间交角为零,可消除调压井内的螺旋水流,调压井下室口受阻不会产生掺气水流运动。

(5)在机组突然增加负荷各种工况下,机组转速随之变化,调压井水位上下波动不断衰减,最终水位稳定。调压井最低涌波水位高于底板高程,满足不掺气的要求,调压井底板高程合理。

3.5.4 波动稳定性计算结果分析 上游水库正常蓄水位 1 102.5 m,调压井直径为 17.5 m,通过小波动公式计算,调速器暂态转差系数 $b_t = 45\%$ 、积分时间常数 $T_d = 7\text{s}$ 、永态转差系数 $b_p = 0$ 、加速度时间常数 $T_n = 0.57\text{s}$,调速器调节时间小于 30 s,机组转速最大偏差小于 4%,负荷波动为 5%,振荡次数小于 1 次,动态品质指标较好,说明调压井稳定断面和体型设计是合理的,水电站运行是安全的。

4 结 论

(1)机组负荷突然发生变化时,机组转速随之变化,调压井水位上下波动不断衰减,最终水位稳定。机组转速、蜗壳和尾水管压力满足规范要求,达到经济安全可靠范围,机组的调节最大偏差小、时间短、振荡次数少,动态品质指标较好。

(2)调压井底板高程为 1 069.5 m 大于最低涌波水位 1 057.5 m,调压井顶高程为 1 108.9 m 大于最高涌波水位 1 106.90 m,满足调压井不掺气和不漫顶的要求。

(3)调速器调节时间小于 30 s,机组转速最大偏差小于 4%,负荷波动 5%,振荡次数小于 1 次,动态品质指标较好。

上述结果表明,调压井稳定断面和体型设计是合理的,水电站可安全运行。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 水电站调压室设计规范:SL 655 - 2014 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2014:1 - 15.
 [2] 史海英,宋海印,韩秋草. 阻抗与溢流相结合的新型调压井研究与应用[J]. 人民黄河,2014, 36(5):113 - 115.
 [3] 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.

- [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] 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,1985:52 - 73.
 [6] 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.
 [7] 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.
 [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] 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,2013:98 - 120.
 [10] 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.
 [11] 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.
 [12] 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.
 [13] 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.
 [14] 洪振国. 水电站调压井的水力学特性[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(3):228 - 234.
 [15] 洪振国. 事故闸门与露天水池相结合调压井设计研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):162 - 166.
 [16] 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.
 [17] 姚元成,何启勇. 引子渡水电站引水系统关键技术[J]. 水力发电,2001,27(9):40 - 43 + 59.
 [18] 谭新莉,柳辉. J2 水电站调压井设计探讨[J]. 东北水利水电,2011,29(10):13 - 14 + 26.
 [19] 古丽萍. 郑旗水电站调压井水力计算[J]. 电力与能源,2009(27):707 + 723.
 [20] 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.
 [21] 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.
 [22] 洪振国,田辉,刘浩林. 调压井托马临界稳定断面计算补充因素修正研究,人民黄河,2018,40(3):118 - 120.
 [23] 方光达. 水电站气垫式调压室应用现状和主要设计问题[J]. 水力发电,2005,31(2):44 - 47.
 [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水力发电厂机电设计规范:DL/T5186 - 2004[S]. 北京:中国电力出版社,2004:1 - 10.