

分流式调压室分流比计算方法

傅宗甫¹,周 琴²,刘明明¹

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 2.上海市水利工程设计研究院,上海 200063)

摘要 以佛子岭抽水蓄能电站的尾水调压室为例,通过二维水流数学模型计算和水工模型试验得到尾水系统河道典型断面以及调压室的水位流量关系.利用图解迭代方法,对分流式调压室的分流比进行了计算,得出了调压室分流比与佛子岭水库坝前水位的关系,并分析了总流量及坝前水位对分流比的影响.指出了发电和抽水工况调压室分流比的差异.该方法对于用单一方法难以完成的工程水力学问题,具有很好的应用价值.

关键词 水电站 分流式调压室 分流比 水位 流量

中图分类号:TV61

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2006)06-0640-05

水电站调压室是压力水道系统中一项重要的建筑物.常规调压室的主要功能是在水轮发电机组丢弃或增加负荷时,利用扩大的断面和自由水面对水锤波进行反射,限制水锤波进入压力引(尾)水道,降低压力管道中的水锤值,使隧洞基本上避免水锤压力的影响,以改善机组在负荷变化时的运行条件及供电质量.而在机组稳定运行时,调压室几乎不起作用,因此现有文献^[1-3]主要研究调压室的水击波反射特性、调压室涌浪及水头损失.

分流式调压室是一种新型的多功能调压室,除具有常规调压室的基本功能外,还在水轮发电机组正常运行过程中起分流作用.由于调压室下游的尾水主洞与河道为并联流道,即当下库水位高于调压室溢流堰顶高程时,一部分水流从下库进出水口进出,另一部分水流则由调压室溢流堰进出,调压室替代了部分尾水主洞的功能,从而有效减小了尾水主洞的洞径,降低了工程造价,节省了投资.或者在主洞洞径一定的情况下,发电时减小尾水主洞流速,减小水头损失,增加发电量,增加效益.该类调压室设计的一项重要内容是调压室分流比的确定,因为它直接关系到选择合适的尾水主洞洞径,因此开展对分流式调压室分流比的研究对于分流式调压室的推广应用是必要的.

本文通过对佛子岭抽水蓄能电站下库河道的数值模拟和下库进出水口(包括尾水调压室)水工模型试验,对分流式尾水调压室在机组正常运行工况(恒定流)下的分流比进行了计算和分析,并分析了总流量及坝前水位对分流比的影响以及发电和抽水工况调压室分流比的差异,得出了分流比与佛子岭水库坝前水位的关系.

1 尾水系统布置

佛子岭抽水蓄能电站位于东淠河佛子岭水库东支黄尾河,磨子潭水库与佛子岭水库之间.佛子岭水库为抽水蓄能电站的下库,下库进出水口位于佛子岭水库大坝上游约 3 200 m,尾水调压室与下库进出水口之间的河道(中线河道)长度约 4 200 m.调压室布置于尾水支洞出口,其下游尾水主洞长约 1 600 m,洞径 12 m,调压室的北侧墙顶做成溢流堰式,堰顶高程 119 m.调压室下游的尾水主洞与中线河道为并联流道,当下库水位低于 119 m 时,水流全部通过尾水主洞由下库进出水口进出.下库水位高于 119 m 时,发电工况一部分水流

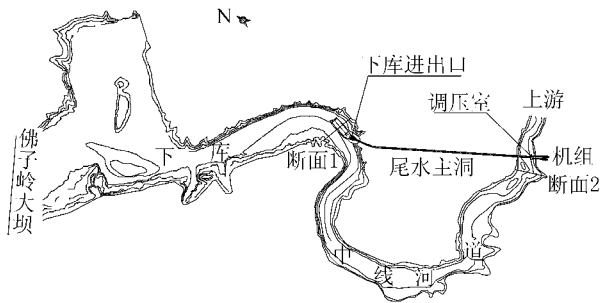


图 1 尾水系统平面布置示意图

Fig.1 Plan layout of tailrace system

通过尾水主洞由下库进出水口流至下库,另一部分水流通过调压室顶部的溢流堰溢入河道,经中线河道流入下库,而抽水工况一部分水流通过下库进出水口及尾水主洞进入尾水支洞,另一部分水流则通过中线河道由调压室溢流堰流入调压室后进入尾水支洞,图 1 为该尾水系统平面布置示意图。

2 调压室分流比计算方法确定

分流式调压室的分流比为调压室进出流量与总流量(下库进出水口进出流量与调压室进出流量之和)的比值。由于本工程调压室所在河道断面至佛子岭水库大坝之间的河道长度约 7 400 m,如果采用整体水工模型试验的方法确定调压室分流比,则模型规模巨大,试验费用昂贵,而且模型试验的周期很长,非常不经济。采用纯数值模拟方法,则需要采用三维水流数学模型。三维水流数学模型目前仅限于计算区域比较小的局部水流计算,带有自由表面流动的计算技术还不够成熟,计算精度也难以保证。对于庞大而复杂的区域,三维水流数学模型的计算工作量巨大,PC 计算机根本无法胜任,必须采用大型的并行机群进行并行计算。

本文采用数值模拟与下库进出水口水工模型试验(几何比尺 $\alpha_L = 30$ 的正态模型)相结合的方法确定调压室的分流比,可集中数学模型和物理模型的优点,有效地克服单纯整体水工模型试验及数值模拟方法中的缺点。调压室的分流比主要与尾水主洞以及中线河道的阻力有关,本文的方法利用下库进出水口水工模型试验模拟尾水主洞阻力,采用数值方法模拟河道的阻力。由于计算区域地形复杂,为了克服一维水流数学模型不足以反映弯道及断面突变等对水流的影响,故选择精度较高的二维水流数学模型^[4-5]。

分流比计算步骤如下:(a)对佛子岭水库大坝上游约 200 m 至调压室所在河道上游约 500 m 之间的河道区域建立沿水深平均的平面二维水动力数学模型,计算图 1 中河道断面 2 水位 H_2 和调压室进出流量 Q_t 并分析它们之间的关系;(b)通过下库进出水口(包括调压室)水工模型试验测得调压室内水位 H_1 与下库进出水口进出流量 Q_x ,通过计算得到水位流量关系曲线以及河道断面 2 与调压室的水位关系;(c)由图解迭代法得到发电与抽水各工况下调压室的分流比 η 。图 2 为分流比计算流程框图。

2.1 数学模型的建立

2.1.1 基本控制方程^[6]

在笛卡儿坐标系下,沿水深平均的二维水动力学方程组为连续性方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

和动量方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = F_x + \nu_t \nabla^2 U \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = F_y + \nu_t \nabla^2 V \tag{3}$$

式中: U, V —— x, y 方向的水深平均流速; h ——水深; ν_t ——水平涡旋黏性系数。

$$F_x = -g \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{\rho h} \tag{4}$$

$$F_y = -g \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{\rho h} \tag{5}$$

$$\tau_a = \rho_a C_D |w_a| w_a \tag{6}$$

$$\tau_b = \frac{\rho g U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} \tag{7}$$

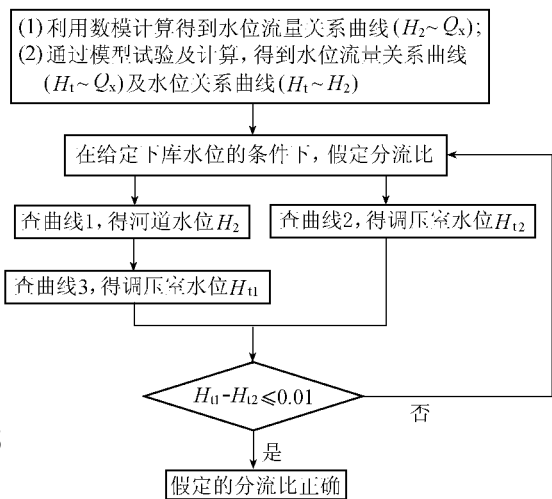


图 2 调压室分流比 η 计算流程
Fig.2 Flow chart for calculating diversion rate η of surge tank

式中： z_b ——床面高程； ρ_a ——空气密度； w_a ——风速； C_D ——风应力系数； τ_{ax}, τ_{ay} ——作用于水面上的风应力在 x, y 方向的分力； ρ ——水密度； g ——重力加速度； C ——谢才系数； τ_{bx}, τ_{by} ——床面摩阻力在 x, y 方向的分力。

为了较准确地模拟河道地形和提高数值模拟精度,采用曲线正交坐标系^[7]. 通过以下变换将方程从笛卡尔坐标系变换到 ξ - η 曲线正交坐标系.

$$G_\eta \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + G_\xi \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + G_\xi G_\eta \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} P + \frac{\partial x}{\partial \eta} Q \right) = 0 \tag{8}$$

$$G_\eta \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} + G_\xi \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + G_\xi G_\eta \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} P + \frac{\partial y}{\partial \eta} Q \right) = 0 \tag{9}$$

式中

$$P = -\frac{1}{G_\xi} \frac{\partial(\ln K)}{\partial \xi} \tag{10}$$

$$Q = \frac{1}{G_\eta} \frac{\partial(\ln K)}{\partial \eta} \tag{11}$$

$$K = \sqrt{G_\xi / G_\eta} \tag{12}$$

式中 $\sqrt{G_\xi}, \sqrt{G_\eta}$ 为变换的拉梅系数,

$$\sqrt{G_\xi} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi}\right)^2} \quad \sqrt{G_\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2} \tag{13}$$

在该坐标系中,连续性方程变为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_\xi G_\eta}} \frac{\partial(hu \sqrt{G_\eta})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_\xi G_\eta}} \frac{\partial(hv \sqrt{G_\xi})}{\partial \eta} = 0 \tag{14}$$

动量方程变为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_\xi G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\xi}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_\xi G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\eta}}{\partial \xi} = \\ - \frac{g}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} - \frac{gu \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + \nu_t \left(\frac{1}{G_\xi} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{G_\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) + M_\xi \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_\xi G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\eta}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_\xi G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\xi}}{\partial \eta} = \\ - \frac{g}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} - \frac{gv \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + \nu_t \left(\frac{1}{G_\xi} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{G_\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) + M_\eta \end{aligned} \tag{16}$$

式中： u, v —— ξ, η 方向的水深平均流速； h ——水深； ζ ——水位； ν_t ——水平涡旋黏性系数； C ——谢才系数.

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6} \tag{17}$$

在两种坐标系流速分量之间, 存在如下的换算关系：

$$U = \frac{u}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad V = \frac{u}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial y}{\partial \eta} \tag{18}$$

2.1.2 离散方法

为了解决压力梯度项和连续方程离散的困难,对上述曲线正交坐标系中的控制微分方程采用交错网格有限体积法离散,并利用交替方向隐式法(ADI 法)进行求解^[8].

2.1.3 边界条件

开边界由出入流水位或流量条件确定. 岸边界采用不可入原理,取法向流速为零,切向流速由曼宁-谢才公式确定. 以切线方向平均流速为零来确定一个适当的法线方向,从而确定转折角边界.

2.2 河道典型断面水位流量关系

在各种下库水位(佛子岭水库坝前水位 H_b)及总流量 Q_z 下,假定不同的调压室进出分流流量 Q_t 或下库进出水口进出流量 Q_x (即从尾水主洞进出的流量),计算下库进出水口明渠开挖段中部河道断面水位 H_1 (对

应图 1 中断面 1)和调压室所在位置下游约 120 m 处河道断面水位 H_2 (对应图 1 中断面 2),图 3 给出了河道断面 2 水位 H_2 与调压室进出分流流量 Q_t 之间的关系($H_2 \sim Q_t$). 从图 3 可以看出,在发电工况相同的坝前水位下,水位 H_2 随流量 Q_t 的增大而上升,坝前水位 H_b 越低, H_2 随 Q_t 增加而上升的趋势越明显 抽水工况,水位 H_2 则随流量 Q_t 的增大而降低,坝前水位 H_b 越低, H_2 随 Q_t 增加而下降的速度越快.

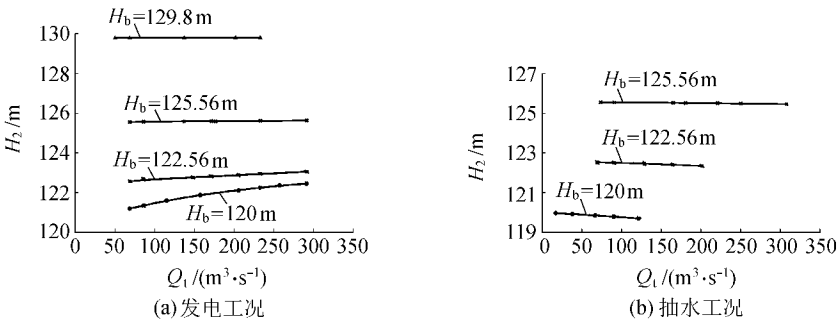


图 3 河道断面水位 H_2 与调压室进出流量 Q_t 的关系

Fig.3 Relationship between water level H_2 of river cross section and water inflow and outflow Q_t of surge tank

2.3 调压室水位流量关系

根据下库进出水口(包括调压室)水工模型试验及计算,得到了调压室水位 H_t 与下库进出水口分流流量 Q_x 的关系曲线($H_t \sim Q_x$)以及调压室水位与河道断面水位 H_2 的关系曲线($H_t \sim H_2$),分别见图 4 和图 5. 从图 4 中可以看到,发电或抽水工况下,几条曲线近似平行,表明调压室内的水位变化主要取决于下库进出水口分流流量,而且发电工况调压室水位随 Q_x 增加变化的速度较快. 图 5 的曲线表明,调压室水位与河道断面水位基本上呈线性关系.

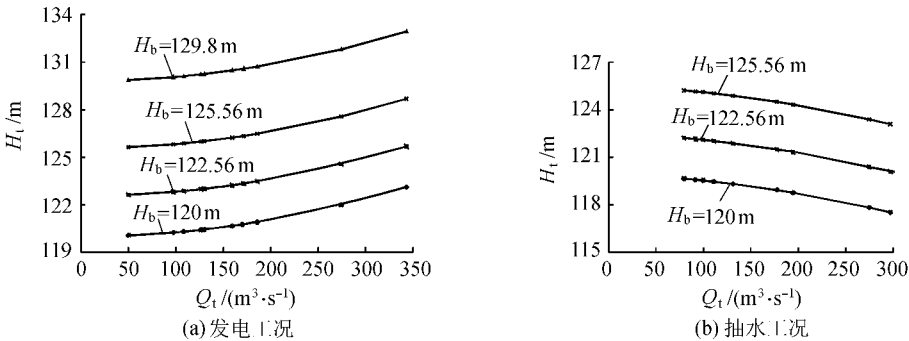


图 4 调压室水位(H_t)与下库进出水口流量(Q_x)的关系

Fig.4 Relationship between water level H_t of surge tank and flow rate Q_x through inlet and outlet of lower reservoir

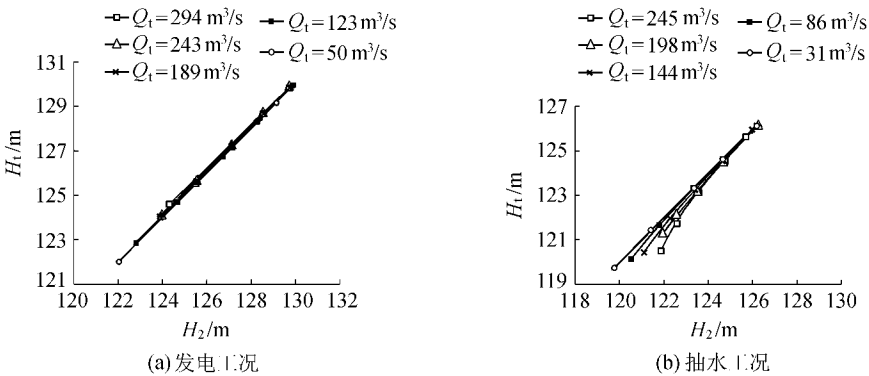


图 5 调压室水位与河道断面水位的关系

Fig.5 Relationship between water levels of surge tank and river cross section

2.4 调压室分流比

根据以上方法得到的关系曲线(图 3 ~ 图 5),通过图解迭代法得到了两种总流量 Q_z 下不同坝前水位 H_b 发电和抽水工况调压室的分流比 η ,如图 6 所示.图 6 的曲线表明,发电和抽水工况调压室的分流比均随着 H_b 的升高而增加,同一类工况(发电或抽水)下,总流量对调压室的分流比有一定的影响,但随着 H_b 的增加,对分流比的影响逐渐减小,在水位低于约 122.3 m 时,分流比随 H_b 的上升增加较快,大于 122.3 m 后逐渐变缓.相同的总流量 Q_z 及坝前水位 H_b ,发电工况的分流比大于抽水工况,而且随坝前水位 H_b 的增加两者之间的差值也越大.

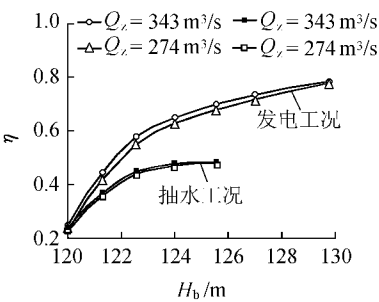


图 6 调压室分流比 η 与下库坝前水位 H_b 关系曲线

Fig.6 Relationship between diversion rate η of surge tank and upstream water level H_b of lower reservoir dam

3 结 语

- a. 采用二维水流数值模拟与水工模型试验相结合确定分流式调压室的分流比,可以集中数学模型和物理模型的优点,提高效率.
- b. 调压室分流比随坝前水位的升高而增加,当坝前水位较低时,分流比随坝前水位的升高增加较快,而后逐渐变缓.
- c. 总流量对分流比有一定的影响,随着坝前水位的升高,影响将逐渐减小.
- d. 在相同总流量及坝前水位的情况下,发电工况分流比大于抽水工况,且随坝前水位的增加两者之间的差值也加大.

参考文献：

[1] 杜贵霞,茹建国,叶复萌,等.水电站尾水调压室形式的试验研究[J].水利水电技术,1994(2) 25-29.
[2] 宋长福,蔡付林,周建旭.阻抗式调压室水头损失系数研究[J].江西水利科技,2003(3) 129-132.
[3] 胡明,蔡付林,曹青.矩形调压室连接形式的研究[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(2) 92-95.
[4] 聂杰,傅宗甫.复杂边界多建筑物的河道水流数值模拟[J].水利水运工程学报,2002(3) 46-50.
[5] 魏文礼,金忠青.复杂边界河道流速场的数值模拟[J].水利学报,1994(11) 26-30.
[6] 程心一.计算流体力学[M].北京:科学出版社,1984 11-56.
[7] 刘子龙,王船海,李光炽,等.长江口三维水流模拟[J].河海大学学报,1996,24(5) 108-110.
[8] 姚仕明,张超,王兴奎.二维同位与交错网格水流数值模拟比较[J].泥沙研究,2005(3) 67-71.

Calculation method for diversion rate of
distributary surge tank

FU Zhong-fu¹, ZHOU Qin², LIU Ming-ming¹

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
- 2. Shanghai Design Institute of Hydraulic Engineering, Shanghai 200063, China)

Abstract With the tailrace surge tank at Fuziling pumped-storage power station taken as an example, the relationships between water level and flow rate of typical river cross section of tailrace system and surge tank were obtained by means of 2-D fluid mathematical model and hydraulic model experiment. The diversion rate of surge tank was calculated with the method of graphic iteration, and the relationship between the diversion rate of surge tank and the upstream water level of the dam of Fuziling Reservoir was obtained. Moreover, the influences of total flow rate and the upstream water level of the dam on diversion rate were analyzed, and the difference between diversion rates under working conditions of power generation and water pumping was pointed out. The method can be applied to dealing with hydraulic problems in practical projects which are difficult to be solved by a single method.

Key words hydropower station ; distributary surge tank ; diversion rate ; water level ; discharge