

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221322

带长连接管的调压室水力特性研究

李煜, 杨绍佳

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 某抽水蓄能电站下游调压室采用阻抗+上室式布置, 尾水洞与连接管通过直角岔管和弯道连接, 布置型式特殊, 水流条件复杂。为研究其水力特性, 建立了调压室底部连接管三维流场数学模型, 研究了不同分流比、汇流比条件下水力特性的变化规律。结果表明, 对于底部流动复杂的调压室阻力损失而言, 三维数值模拟能取得较好的仿真效果, 计算结果与理论分析结果吻合良好。由于调压室底部弯管、连接管与大井之间的突扩、突缩等均会引起额外的水力损失, 其水头损失系数大于常规阻抗调压室, 流量系数较单独的阻抗孔更小。

关键词: 调压室; 长连接管; 三维流场数值模拟; 水头损失系数

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0089-04

1 概况

某抽水蓄能电站尾水洞内径为 6.2 m。尾水调压室设置在尾水岔管下游 20.0 m 处, 采用阻抗+上室式, 调压室大井直径为 13.0 m, 长度为 76.0 m; 阻抗孔直径为 5.0 m。尾水洞与连接管通过直角岔管和弯道连接, 岔管支臂中心高程低于尾水洞中心高程 0.6 m, 弯道内径为 5.0 m, 中心转弯半径为 5.0 m。连接管长度约 66.0 m。其布置见图 1。该工程尾水调压室阻抗孔/尾水隧洞面积比约为 64%, 大于常规阻抗式调压室, 水力特性可能与常规阻抗式调压室存在一定差异。选取此工程进行三维流场数值模拟, 分析调压室进/出流水力特性具有重要工程实际意义。因此, 本文通过建立调压室底部连续管三维流场

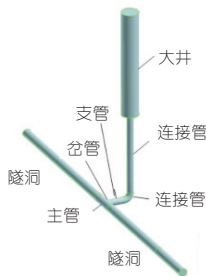


图 1 某抽水蓄能电站下游调压室布置图

Fig. 1 Layout of downstream surge chamber of a pumped storage power station

数学模型, 分析不同分流比、汇流比条件下水力特性的变化规律, 以期工程实践提供指导。

2 数学模型

描述任意流体流动的连续方程和动量方程称为 Navier-Stokes 方程^[1,2]。本文研究的调压室底部水头损失系数并不需要考虑流体弹性及非恒定边界条件下水体惯性的影响。因此, 略去连续方程和动量方程中的密度散度和变量随时间的变化项, 并引入斯托克斯应力变形关系可得:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为流体质点速度沿 x 、 y 、 z 方向的分量; ρ 为水密度; p 为压力; v 为水的动力粘度; g 为重力加速度。

收稿日期: 2022-06-27, 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ23E090002)

作者简介: 李煜(1983-), 男, 工程师, 研究方向为水力学, E-mail: li_y2@hdec.com

湍流可视为时间平均流动和瞬时脉动流动的叠加运动,且任意变量 ϕ 的时均值可由雷诺平均法表示。

细微的密度变化对流动的影响并不明显,因此可忽略密度脉动。以 \mathbf{V} 表示速度矢量,将式(3)、(4)整体时均化,代入变量时均化关系后通过雷诺平均法则,并采用简写形式可得:

$$\text{div}\bar{\mathbf{V}} = 0 \tag{5}$$

$$\bar{\mathbf{V}} \cdot \text{div}\bar{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}\bar{\mathbf{u}}) + \left[\frac{\partial(-\overline{u'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z} \right] \tag{6}$$

$$\bar{\mathbf{V}} \cdot \text{div}\bar{\mathbf{v}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}\bar{\mathbf{v}}) + \left[\frac{\partial(-\overline{v'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{v'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{v'w'})}{\partial z} \right] + g \tag{7}$$

$$\bar{\mathbf{V}} \cdot \text{div}\bar{\mathbf{w}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}\bar{\mathbf{w}}) + \left[\frac{\partial(-\overline{w'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{w'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{w'w'})}{\partial z} \right] \tag{8}$$

式中, $\bar{\mathbf{V}}$ 为时均速度; $\bar{\mathbf{u}}$ 、 $\bar{\mathbf{v}}$ 、 $\bar{\mathbf{w}}$ 分别为流体质点时均速度沿 x 、 y 、 z 方向的分量; \bar{p} 为作用于流体微元上的压强时均值; $\overline{u'}$ 、 $\overline{v'}$ 、 $\overline{w'}$ 分别为流体质点脉动速度沿 x 、 y 、 z 方向的分量。

其他变量的处理方式类似。

式(8)中的雷诺应力项为新的未知量,为使方程组封闭,必须对雷诺应力加以处理,建立湍流脉动值和时均值之间的联系,采用涡粘模型求解封闭整个方程组^[3-5]。该模型不直接处理雷诺应力项,而是引入湍动粘度形式建立湍流脉动值和时均值之间的关系,即:

$$-\rho(\overline{u'u'} + \overline{u'v'} + \overline{u'w'}) = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \tag{9}$$

$$-\rho(\overline{v'u'} + \overline{v'v'} + \overline{v'w'}) = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho k \tag{10}$$

$$-\rho(\overline{w'u'} + \overline{w'v'} + \overline{w'w'}) = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \rho k \tag{11}$$

其中 $k = \frac{1}{2}(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})$ (12)

式中, μ_t 为湍动粘度; k 为湍动动能。

引入涡粘假定后,湍动粘度仍将导致方程组无法封闭,现今较为流行的做法是引入参数湍动

耗散率,并建立其与湍动动能的输运方程及湍动粘度与它们之间的联系。湍动耗散率 ϵ 定义为:

$$\epsilon = \nu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} \tag{13}$$

式中, $\overline{u'_i}$ 、 $\overline{u'_j}$ 分别为脉动速度沿 x 、 y 方向上的分量。

湍动粘度和湍动动能及湍动耗散率之间的关系定义为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \epsilon \tag{14}$$

式中, C_μ 为经验常数。

另外,将湍动动能及湍动耗散率带入变量输运方程可得:

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \kappa}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \kappa}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \kappa}{\partial z} &= \left(\nu + \frac{\mu_t}{\rho} \right) \cdot \\ &\left(\frac{\partial^2 \kappa}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \kappa}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \kappa}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} G_\kappa - \epsilon \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} &= \left(\nu + \frac{\mu_t}{\rho} \right) \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \right. \\ &\left. \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \right) + C_1 S \epsilon - C_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \epsilon}} \end{aligned} \tag{16}$$

式中, G_κ 为由时均速度梯度引起的湍动能 κ 的产生项; C_1 、 C_2 均为系数; S 为源项。

另外,式(6)减去式(8)可得脉动场的动量方程,该方程经变换整理后可得不可压缩湍流的雷诺应力输运方程,简单起见,该方程张量中的指标符号表示为:

$$-\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial}{\partial x_k} = D_{ij} + \varphi_{ij} - \epsilon_{ij} + P_{ij} \tag{17}$$

式中, D_{ij} 为湍流扩散项; φ_{ij} 为雷诺应力对时均流场所作的变形功; ϵ_{ij} 为湍流脉动压强与脉动变形率的关联关系; P_{ij} 为湍流耗散项。

式(5)~(17)共有 13 个方程,其中所含未知量为 \bar{u} 、 \bar{v} 、 \bar{w} 、 \bar{p} 、 $\overline{u'u'}$ 、 $\overline{u'v'}$ 、 $\overline{u'w'}$ 、 $\overline{v'v'}$ 、 $\overline{u'w'}$ 、 $\overline{w'w'}$ 、 k 、 ϵ 、 μ_t 共 13 个,说明方程组封闭,可通过数值方法求解。

3 水力特性分析

研究带长连接管的调压室水力特性,应分析基于流速分布、压力分布、水头损失等水力特性的不同运行工况时所带来的相关参数的变化。以进出调压室的流量与隧洞总流量之比作为分流和汇流比。

3.1 流速分布

水流以 0、0.25、0.5、0.75、1 五种分流比进入调压室时,调压室底部流速分布典型情况见图 2。

正常发电工况或抽水工况(分流比为 0),调压室底部隧洞水流平顺,基本为均匀管流,在隧洞

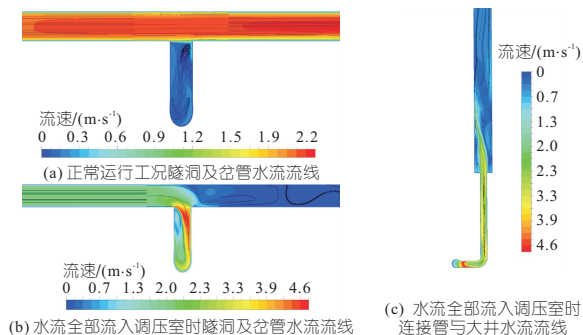


图 2 水流流入时调压室底部流速分布典型情况

Fig. 2 Typical working conditions of velocity distribution at the bottom of surge chamber when water flows in

水流剪切作用下,岔管支管内形成微弱的立轴回流,这也是次运行条件下调压室底部水头损失的主要诱因。

隧洞内部分(或全部)水流进入调压室时,水流先在平面上 90°偏转进入岔管支管,主流集中于支管迎水面一侧,背水面侧形成回流。支管水流经弯道进入连接管,背水面上发生边界层分离,形成回流。水流自连接管进入大井后,发生扩散,并逐步区域均匀,大井内水流稳定。且随着分流比增大,支管内剪切回流强度和范围逐渐增加,下游隧洞内水流流动逐渐减弱。

水流以 0、0.25、0.5、0.75、1 五种汇流比流出调压室时,调压室底部流速分布典型情况见图 3。

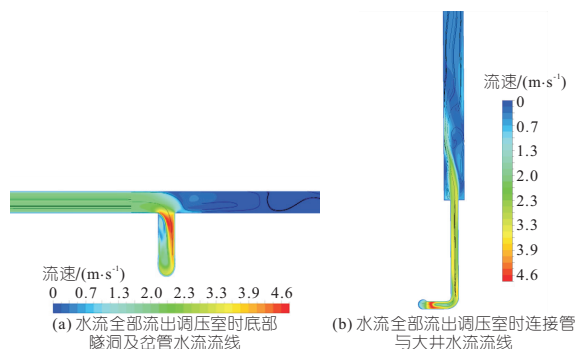


图 3 水流流出时调压室底部流速分布典型情况

Fig. 3 Typical conditions of velocity distribution at the bottom of surge chamber when water flows out

大井内水流先收缩进入连接管,大井底部周边形成对称回流区,水流整体平顺。水流自连接管流过弯道时,主流集中于岔管支管底部,并在顶部形成弱回流。支管水流经 90°转弯进入隧洞后,主流偏向于迎水面,在隧洞背水面区域再次产生回流,其后隧洞水流趋于均匀。且随着分流比增大,支管内剪切回流强度和范围逐渐增加,下游隧洞内水流流动逐渐减弱。

3.2 压力分布

水流以 0、0.25、0.5、0.75、1 五种分流比流入调压室时,调压室底部压力分布典型情况见图 4。

正常发电工况或抽水工况(分流比为 0),调压室底部隧洞压力变化均匀,无压力突变区域,流态良好。当水流部分(或全部)流入调压室时,管道回流区内压力较主流区略低,但整个管路系统压力分布均匀。

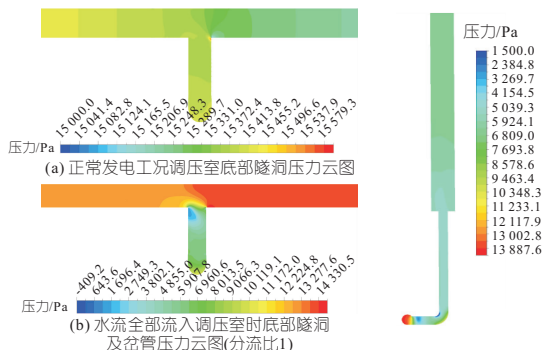


图 4 水流流入时调压室底部压力分布典型情况

Fig. 4 Typical conditions of pressure distribution at the bottom of surge chamber when water flows in

水流以 0、0.25、0.5、0.75、1 五种汇流比流出调压室时,调压室底部压力分布典型情况见图 5。当水流部分(或全部)由调压室汇入时,支管、连接管及大井内各回流区压力较主流区更低。水流部分由调压室汇入时,连接管、大井内及岔管内压力分布较全部由调压室汇入时更为均匀,隧洞内水流流动则较全部由调压室汇入时更为紊乱,回流区较长,压力梯度较为明显。

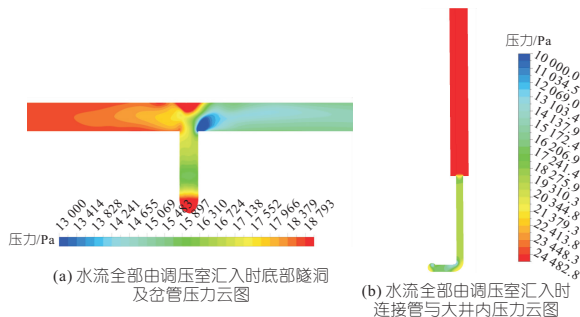


图 5 水流流出时调压室底部压力分布典型情况

Fig. 5 Typical conditions of pressure distribution at the bottom of surge chamber when water flows out

3.3 水头损失

通过三维流场数值模拟确定不同分流、汇流比条件下调压室底部水头损失系数,水头损失与分流比和汇流比的关系见图 6。正常发电和抽水运行时,调压室底部水头损失系数为 0.097,与规范参考值(0.1)^[6]基本一致。因此,某抽水蓄能电站正常发电和抽水运行条件下尾水调压室底部水头损失系数可取为 0.1。随着分流比增加,调压室底部水头损失系数也逐渐增大。随着汇流比增加,调压室底部水头损失系数也逐渐增大。对于调压室底部复杂流动的阻力损失而言,三维数值

