

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.02.012

底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析

黄静之,周建旭,刘跃飞,张健

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要: 为了研究底部设置隔壁式岔管的调压室复杂水力特性,通过构建底部设置隔壁式岔管的调压室结构的三维数值计算模型,分析了典型流态下调压室的水流流态特性、分流/合流流态下局部水头损失系数与分流比的关系、正常运行工况下水流流经调压室底部的水头损失系数和水头损失特性,并推导得到了水流全部流进/流出调压室的水头损失系数和流量系数转换公式,较全面阐明了底部设置隔壁式岔管的调压室的局部水力特性。结果表明,三维数值模拟方法能准确揭示相应调压室结构的水力特性,水流全部流进/流出调压室的流量系数总体介于0.6~0.8之间,与规范相比,水流流进/流出调压室的流量系数相对较大。

关键词: 隔壁式岔管;调压室;水头损失系数;流量系数;分流比;数值模拟

中图分类号: TV732.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)02-0176-06

3D numerical analysis of hydraulic characteristics for surge chamber with partition-type bifurcated pipe in bottom

HUANG Jingzhi, ZHOU Jianxu, LIU Yuefei, ZHANG Jian

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the complex hydraulic characteristics of the surge chamber with partition-type bifurcation pipe in bottom, a three-dimensional numerical model is built to analyze the local water flow patterns under typical flow regimes, the relationship of local head loss coefficient and split ratio under split/combined flow state, the head loss coefficient of flow through the bottom of surge chamber under normal operation state and the head loss characteristics. Moreover, a conversion formula is derived between the head loss coefficient and the flow coefficient when all water flows into/out of the surge chamber. Based on the analysis, the local hydraulic characteristics of surge chamber with partition-type bifurcated pipe in bottom are completely clarified. The results show that, the numerical simulation method can accurately reveal the hydraulic characteristics of the given surge chamber and the computed flow coefficient flowing into/out of the surge chamber is mostly between 0.6 and 0.8, which is relatively larger than the code.

Key words: partition-type bifurcated pipe; surge chamber; head loss coefficient; flow coefficient; split ratio; numerical simulation

在多机引水式水电站输水系统的布置设计中,需要设置分岔管实现一洞两机或者一洞多机的布置方式。分岔管是较为复杂的空间结构,分岔管内水流流态比较复杂,水头损失较大,在整个水电站引水发电系统水力设计中占重要地位^[1]。不同于常用的分岔管结构形式^[2-4],隔壁式岔管是一种特殊的分岔管形式^[5-7],与常规分岔管相比,隔壁式岔管在分岔处结构完整,无相互切割,由于有隔壁支墩的支撑,结构受力条件好^[8],可应用于各种水头的水电站工程。同时,在压力管道分岔的特征断面处设置调压室是常见的布置方式,底部设置隔壁式岔管的调压室系统水力特性复杂,调压室底部的流态和水头损失特性直接影响水力发电系统的运行效率和稳定性,而在过渡过程中水流流进/流出调压室的阻力特性亦直接影响调压室反射水锤的效果和调压室的涌浪特性。对于底部设置分岔管的调压室系统,通过局部水力模型试验或三维数值模拟,能实现调压室局部水流流态的模拟和水力损失特性的分析,两者的分析成果可互为验证和校核,相比较而言,三维数

基金项目: 国家自然科学基金(51879087)

作者简介: 黄静之(1994—),女,硕士研究生,主要从事水力过渡过程研究。E-mail:1349760080@qq.com

通信作者: 周建旭,教授。E-mail:jianxuzhou@163.com

引用本文: 黄静之,周建旭,刘跃飞,等.底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):176-181.

HUANG Jingzhi, ZHOU Jianxu, LIU Yuefei, et al. 3D numerical analysis of hydraulic characteristics for surge chamber with partition-type bifurcated pipe in bottom[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(2): 176-181.

值模拟能较为直观地揭示调压室局部的水流流态及其演化规律。

近年来基于计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟研究分岔管水力特性以及调压室阻力特性的研究取得了多方面的成果。毛根海等^[9]结合卜型岔管不同工况下的水流流态和水头损失特性等,验证了数值计算与试验研究成果良好的一致性;程永光等^[10]结合两机共用一室和三机共用尾水调压室的底部管道交汇方式,采用 CFD 模拟技术对调压室运行时的流态和水头损失进行了模拟分析,并结合水力优化计算阐明了调压室底部交汇形式布置的相关问题^[10];梁春光等^[11]以月牙肋岔管为对象,结合三维数值模拟方法分析了肋宽比、分岔角等体型参数对分岔管水力特性的影响规律;林劲松等^[12]采用 Fluent 软件模拟了某水电站调压室内的三维流场,呈现了调压室内水位变化的动态过程;郑文玲等^[13]采用模型试验和数值模拟相互验证的方法探求异型岔管的水力特性,结果表明数值模拟值均小于试验值,误差不超过 15%,且数值模拟结果更直观反映了分岔管处流态分布以及压强分布;丁宁等^[14]采用 VOF 方法,对某水电站机组全负荷工况下调压室内涌浪过程进行了数值模拟,验证了数值模拟方法的可靠性。以往的研究主要针对传统分岔管形式和调压室局部布置方式,结合模型试验和数值模拟技术开展系统的水力特性分析,而针对隔壁式岔管的研究较少,对调压室底部设置隔壁式岔管的研究更少。为此。本文针对底部设置隔壁式岔管的调压室结构,采用三维模拟技术较全面分析典型流态下调压室结构的水力特性,以期调压器水头损失特性和局部的水流流态分析提供参考。

1 调压室结构三维建模

某引水式水电站设计发电流量 $136\text{ m}^3/\text{s}$,有压引水隧洞洞线长 3.7 km ,洞径 7.5 m ,采用隔壁式岔管分岔成两根支管,支管断面为城门洞型断面,其当量直径为 5 m 。如图 1(a) 所示,在分岔点位置设置阻抗式调压室,调压室底部隧洞为矩形渐变断面,由 $7.6\text{ m}\times 6\text{ m}$ (宽 $\times$ 高,断面 2) 渐变到 $9\text{ m}\times 6\text{ m}$ (断面 3,矩形断面后半部分被隔壁支墩分隔成两个 $3.5\text{ m}\times 6\text{ m}$ 断面)。

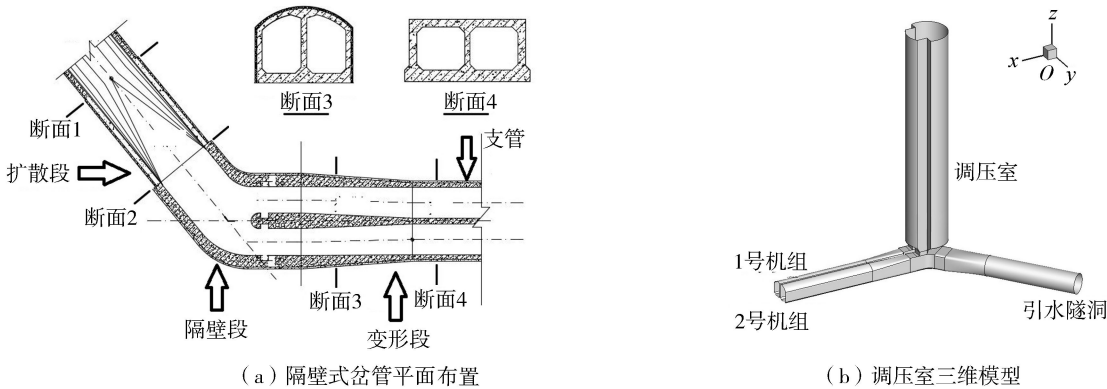


图 1 隔壁式岔管平面布置和调压室三维模型

Fig.1 Plan view of partition-type bifurcated pipe and three-dimensional model of surge chamber

该设置隔壁式岔管的调压室局部结构及其内部流场和流态较为复杂,其阻抗孔口水头损失系数与分岔管处流道的几何形状和调压室局部的流场等因素密切相关。调压室大井断面直径为 15.4 m ,有效面积为 177 m^2 ,兼做阻抗孔口的两个闸门孔为梯形,有效面积均为 28 m^2 。利用 GAMBIT 软件建模(图 1(b))及网格划分,网格无关性验证表明当网格间距小于 0.4 m 时对局部阻力损失系数的计算结果基本没有影响,因此网格间距设置为 0.4 m 。采用网格自动生成技术生成网格,网格大小一致,在调压室流道与阻抗孔口连接部分采用四面体网格,其他规则部位则采用六面体网格。以 Fluent 流体力学计算软件为平台^[15],采用计算流动类型较为广泛、结果与真实湍流情形吻合较好的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[16]模拟计算,离散方法为有限体积法,动量、耗散率采用二阶迎风格式离散,压力-速度耦合计算采用 SIMPLEC 算法,采用基于压力分离式的求解器求解,管壁设置为无滑移边界条件,壁面粗糙厚度设置为 0.03 mm 。

1.1 基本控制方程

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型计算逆压力梯度、射流扩散率以及模拟分离、回流和旋转时有较高的精度,且收敛速度较快,基本方程^[17]为

N-S 方程

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \mu_j \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{d} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j \partial x_j} + B_i$$

(1)

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

(2)

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

(3)

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b$$

(4)

式中: t ——时间; x_j μ_j —— j 方向上的坐标分量和流速分量; P ——压力; ν ——运动黏性系数; B_i ——单位体积力; k ——湍动能; ρ ——水的密度; G_k 、 G_b ——平均速度梯度和浮力的湍动产生项; Y_M ——可压缩流脉动膨胀对总耗散率的影响; 其他参数含义可参见文献[18]。

1.2 水力损失特性与调压室阻抗孔口的流量系数

控制断面均在流速分布较均匀的断面, 动能修正系数 $a_i = a_j \approx 1$, 由能量方程 $H = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$ 得到控制断面 i 和 j 之间的水头损失^[15] 为

$$\Delta H_{ij} = \left(Z_i + \frac{P_i}{\rho g} \right) - \left(Z_j + \frac{P_j}{\rho g} \right) + \left(\frac{v_i^2}{2g} - \frac{v_j^2}{2g} \right) = \xi_{ij} \frac{v^2}{2g}$$

(5)

式中: ΔH_{ij} ——控制断面 i 和 j 之间的水头差; Z_i 、 Z_j ——控制断面 i 、 j 的高程; P_i 、 P_j ——控制断面 i 、 j 的压强; v_i 、 v_j ——控制断面 i 、 j 的流速; v ——特征断面流速; g ——重力加速度; ξ_{ij} ——控制断面 i 和 j 之间的水头损失系数。

在实际工程应用中, 水流流进/流出调压室时的局部水头损失可由下式^[1] 计算得到:

$$\Delta H = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{\varphi A_c} \right)^2$$

(6)

式中: ΔH ——水流流进/流出调压室的水头损失值; φ ——水流流进/流出调压室的流量系数; A_c ——阻抗孔口面积。

单机运行时, 联立式 (5) 和式 (6) 可得转换后的流量系数 φ_{ij} 为

$$\varphi_{ij} = \sqrt{\frac{A^2}{\xi_{ij} A_c^2}}$$

(7)

式中: A ——调压室基准断面面积。当双机组运行时, 考虑支管水流全部流进调压室, 或调压室水流全部流向支管, 则有:

$$\varphi_{ij} = 2 \sqrt{\frac{A^2}{\xi_{ij} A_c^2}}$$

(8)

2 模拟结果与分析

2.1 模拟工况

数值模拟工况包括机组正常稳定运行发电时水流流经调压室底部^[19], 以及在机组增、减负荷和弃荷工况下, 调压室水位上升和下降时水流流进/流出调压室时的情况。本文主要对其中 4 种典型的分流/合流流态进行数值模拟分析, 并与《水工设计手册》^[1] 推荐的计算调压室局部水头损失的经验公式计算结果相比较。4 种典型的流态如图 2 所示, 流态 1~4 对应的基准流速分别为 v_0 、 v_1 (v_2)、 v_1 (v_2)、 v_0 , 其中断面 0 为发电引水隧

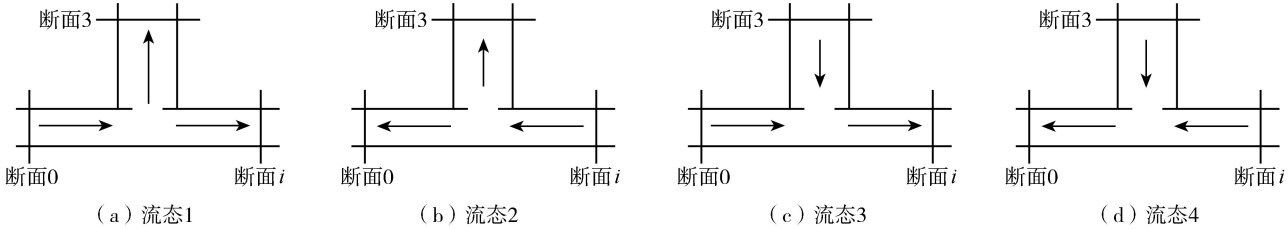


图 2 4 种典型的模拟流态

Fig. 2 Four typical flow regimes

洞特征断面,断面 $i(i=1,2)$ 为 1 号和 2 号发电引水支管的特征断面,断面 3 为调压室井体的控制断面。

以调压室中心线为基准,调压室上下游管道的控制断面选在对应管径 5 倍距离处,调压室内控制断面选在调压室直径 5 倍距离处。流态 1 和 2 模拟调压室水位上升的情况,流态 3 和 4 模拟调压室水位下降的情况。

2.2 调压室局部水头损失系数

针对图 2 给出的 4 种流态进行调压室局部水头损失特性的数值模拟分析,单机组运行时额定流量为 $68\text{ m}^3/\text{s}$,双机组运行时额定流量为 $136\text{ m}^3/\text{s}$ 。各工况计算分析中,对应水流全部流进/流出调压室(分流比等于 1)的情况,分别给出 CFD 模拟分析得到的水头损失系数和按式(7)或(8)转化得到的调压室阻抗孔口流量系数如表 1 所示。

单机组运行或双机组运行时在流态 1(分流)、流态 4(合流)不同分流比情况下各控制断面之间的水头损失系数数值模拟结果见图 3。两种流态分流比定义为 Q_i/Q_0 (下标代表控制断面),当双机组运行时分流比为两支管流量之和除以 Q_0 。

由表 1 和图 3 可知:随着分流比增大,单机组运行时水流流经调压室底部的水头损失系数明显大于双机组运行时的水头损失系数,且流态 4 中单机组运行时水头损失系数呈上升趋势,而双机组运行时水头损失系数呈下降趋势,这是由于单机组运行时随着分流比增大,分岔处水流流速变大因而动能损失增大,双机组运行时随着分流比增大,分岔处流态趋于平顺,流经调压室底部水头损失减小;单机组或双机组运行条件下,随着水流流进/流出调压室流量的分流比增大, ξ_{03} 和 ξ_{30} 均逐步趋于一致,即水流从引水隧洞全部流进调压室或水流由调压室全部流向引水隧洞的水头损失系数基本一致,相差在 1.5% 以内,此时,水流全部流进/流出调压室的水头损失系数大小与流量无关,只与调压室及其底部分岔管体型、水流方向有关,且在数值模拟中流道尺寸和水流雷诺数足够大,水流进入了阻力平方区。对于流态 2、3,单机组运行,水流全部流进/流出调压室时的水头损失系数明显小于双机组运行时的水头损失系数,这主要是因为 1 号和 2 号发电引水支管的流道在调压室底部是连通的,单机组运行时,水流可以从两个闸门孔流进/流出调压室,相当于阻抗孔的面积增大了 1 倍且双机组运行时水流更加平顺;对比水流流进/流出调压室的流量系数,总体上水流流出调压室的流量系数大于水流流进调压室的流量系数。

表 1 水流全部流进/流出调压室的
水头损失系数和流量系数

Table 1 Head loss coefficient and corresponding flow coefficient of water flowing into/out of surge chamber

运行方式	流态	水流流向	ξ_{ij}	φ_{ij}
单机组运行 (1 号机组)	1	0→3	5.006	0.720
	2	1→3	5.280	0.594
	3	3→1	3.862	0.610
	4	3→0	3.252	0.899
单机组运行 (2 号机组)	1	0→3	5.067	0.720
	2	2→3	2.009	0.573
	3	3→2	1.765	0.611
	4	3→0	3.246	0.899
双机组运行 (1 号机组)	1	0→3	5.006	0.724
	2	1→3	5.280	0.706
	3	3→1	3.862	0.826
	4	3→0	3.252	0.898
双机组运行 (2 号机组)	1	0→3	5.006	0.724
	2	2→3	5.238	0.709
	3	3→2	3.885	0.824
	4	3→0	3.252	0.898

注:水流流向 0→3 表示水流从断面 0 流向断面 3。

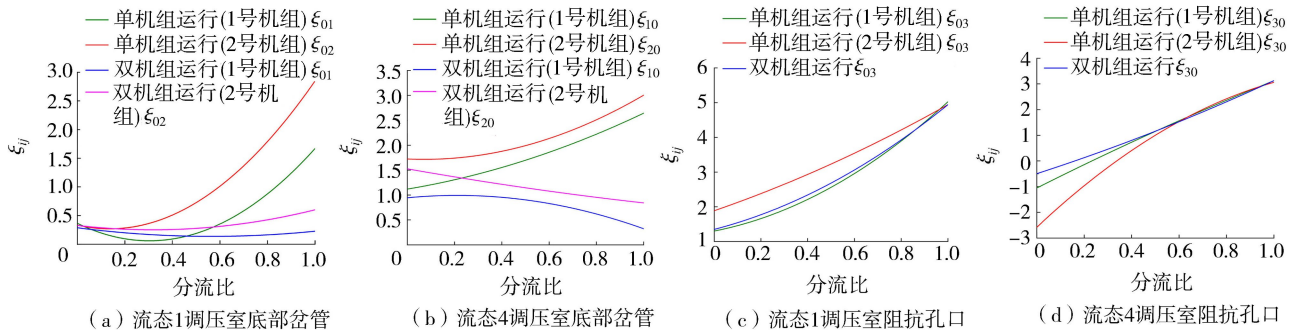


图 3 调压室水头损失系数与分流比关系曲线

Fig. 3 Relation curves between head loss coefficient and split ratio of surge chamber

由表 1 可知:利用 CFD 三维模拟,水流全部流进/流出调压室的水头损失系数转换为对应的阻抗孔口流量系数时,基本上位于 SL655—2014《水利水电工程调压室设计规范》给出的 0.6~0.8 区间范围内,整体上偏大,验证了利用 CFD 研究分岔管水力特性以及调压室系数的可行性和准确性,同时也表明,对于底部设置隔壁式岔管的调压室系统而言,水流通过阻抗孔口流进/流出调压室的流量系数相对较大,反射水锤的效果相对较优。进一步利用 CFD 模拟正常运行工况下水流正/反向流经调压室底部的水头损失系数,结果见表 2。

由表 2 可知:单机组运行时,水流流经调压室底部的水头损失系数略大于双机组运行时的水头损失系数,这是由于两条引水支管同时运行时,水流更加平顺;由于流道不对称,在引水支管单管运行时,断面 0 至断面 1 与断面 0 至断面 2 之间的水头损失系数相差较大;水流正/反向流经调压室底部水头损失系数相差不大,说明了隔壁式岔管双向流态较好。

在不同的运行条件下,水流流经调压室底部的水头损失系数存在明显的差别,说明在恒定流流态时水流流经调压室底部的水头损失系数与分岔管流道体型以及水流方向密切相关,图 4 和图 5 分别给出了双机组运行时水流正/反向流经调压室底部的压力云图和速度云图。

表 2 水流流经调压室底部的水头损失系数

Table 2 Head loss coefficient of water flowing through bottom of surge chamber

运行方式	水流流向	ζ_{ij}
单机组运行(1 号机组)	0→1	0.4672
	1→0	0.7127
单机组运行(2 号机组)	0→2	0.7473
	2→0	0.6668
双机组运行(1 号机组)	0→1	0.2839
	1→0	0.2313
双机组运行(2 号机组)	0→2	0.6238
	2→0	0.7495

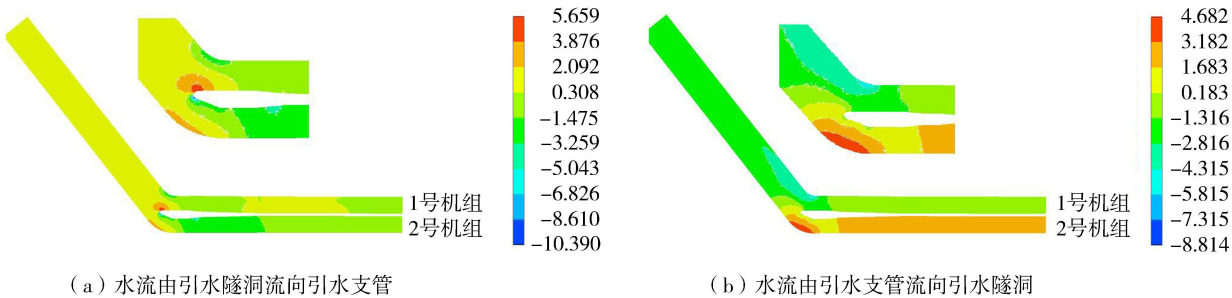


图 4 水流流经调压室底部压力云图(单位:kPa)

Fig. 4 Pressure nephograms of water flowing through the bottom of surge chamber(units:kPa)

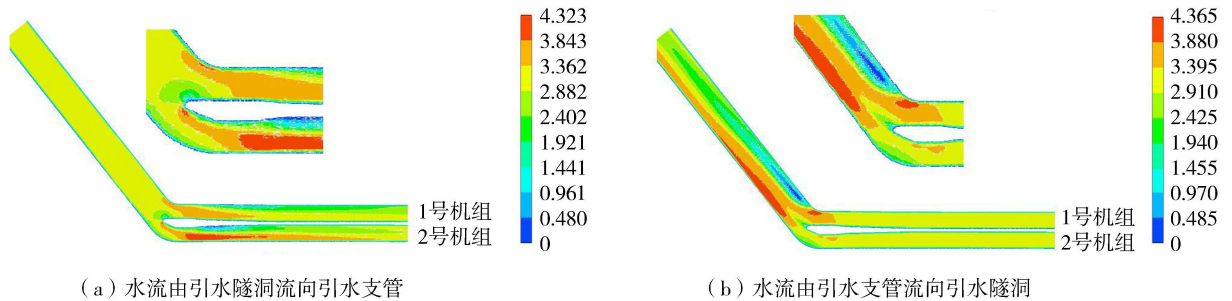


图 5 水流流经调压室底部速度云图(单位:m/s)

Fig. 5 Velocity nephograms of water flowing through the bottom of surge chamber(units:m/s)

由表 2 和图 4、图 5 可知:当水流正向经过调压室底部和隔壁式岔管进入两根引水支管时,流态稳定,在正对水流方向的分岔点处水流冲击壁面,流速减小压力升高,总体上水流进入 2 号引水支管转弯较大,局部流速相对较大,压力分布和流速分布较不均匀,导致水流由引水隧洞至 2 号引水支管的局部水头损失明显偏大;当两根引水支管水流反向经过隔壁式岔管和调压室底部合流至引水隧洞时,2 号引水支管水流在分岔点处冲击管壁面,局部流速减小压力升高,而后受离心力作用,2 号引水支管水流进入引水隧洞时水流流速明显增大,流速分布不均匀,导致水流由 2 号引水支管至引水隧洞的局部水头损失较大。

3 结 论

a. 水流全部流进/流出调压室阻抗孔口的流量系数基本上位于规范 0.6~0.8 区间内,整体上偏大,表明对于底部设置隔壁式岔管的调压室结构而言,水流通过阻抗孔口流进/流出调压室的流量系数相对较大,反射水锤的效果相对较优。

b. 水流正/反向经过隔壁式岔管的水头损失系数较小,且水流反向流经隔壁式岔管的水头损失系数均小于水流反向流经隔壁式岔管的水头损失系数,反向过流能力较好,但相差不大。

c. 隔壁式岔管分岔局部双向过流流态均较好,流场流线均比较平顺,无明显涡流和紊动,可合理应用于各种水头的引水式水电站中。

d. 用三维模拟技术研究水流流进/流出调压室以及水流流经隔壁式岔管的水损失系数是可行的。

参考文献:

- [1] 华东水利学院. 水工设计手册(第七卷):水电站建筑物[M]. 北京:水利电力出版社,1989.
- [2] 苏凯,李聪安,伍鹤皋,等. 水电站月牙肋钢岔管研究进展综述[J]. 水利学报,2017,48(8):968-976. (SU Kai, LI Congan, WU Hegao, et al. Review of the crescent-rib steel bifurcation of hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 968-976. (in Chinese))
- [3] 高学平,张尚华,韩延成,等. 引水岔管水力特性三维数值计算[J]. 中国农村水利水电,2005(12):93-97. (GAO Xueping, ZHANG Shanghua, HAN Yancheng, et al. 3-D numerical simulation of hydraulic characteristics in water diversion bifurcated pipes [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(12):93-97. (in Chinese))
- [4] 顾欣欣. 抽水蓄能电站卜型岔管水流数值模拟与优化研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
- [5] 杨小妹. 高水头大PD值埋藏式岔管设计及计算分析[D]. 西安:西安理工大学,2007.
- [6] 王志国,陈永兴. 西龙池抽水蓄能电站内加强月牙肋岔管围岩分担内水压力设计[J]. 水力发电学报,2006,25(6):61-66. (WANG Zhiguo, CHEN Yongxing. Design of surrounding rock to share internal water pressure in crescent ribbed Y-pipes of Xilongchi Pumped-Storage Power Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 61-66. (in Chinese))
- [7] 张秀丽,张伯纳. 新型隔壁式高压岔管结构研究[J]. 水力发电,2001(1):36-39. (ZHANG Xiuli, ZHANG Bona. Study on a new structure of a partition-type bifurcated-pipe[J]. Hydroelectric Power, 2001(1):36-39. (in Chinese))
- [8] 陆晓敏,刘启钊. 地下隔壁式钢筋混凝土岔管的应力研究[J]. 河海大学学报,1996,24(5):27-31. (LU Xiaomin, LIU Qizhao. Stress analysis for underground reinforced concrete partition manifold[J]. Journal of Hohai University, 1996, 24(5): 27-31. (in Chinese))
- [9] 毛根海,章军军,程伟平,等. 卜型岔管水力模型试验及三维数值计算研究[J]. 水力发电学报,2005(2):16-20. (MAO Genhai, ZHANG Junjun, CHENG Weiping, et al. Experimental study and 3-D numerical simulation on water flow in Y-type pipe [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005(2):16-20. (in Chinese))
- [10] 程永光,刘晓峰,杨建东. 大型尾水调压室底部交汇型式CFD分析与优化[J]. 水力发电学报,2007,26(5):68-74. (CHENG Yongguang, LIU Xiaofeng, YANG Jiandong. Optimization of the converging type of conduit of tailrace surge tank by CFD method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5):68-74. (in Chinese))
- [11] 梁春光,程永光. 基于CFD的抽水蓄能电站岔管水力优化[J]. 水力发电学报,2010,29(3):84-91. (LIANG Chunguang, CHENG Yongguang. Hydraulic optimization of pipe bifurcation of pumped-storage power station by CFD method[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2010, 29(3):84-91. (in Chinese))
- [12] 林劲松,巨江,诸亮,等. 水电站水力过渡过程仿真计算的工程应用[J]. 水力发电学报,2010,29(1):31-37. (LIN Jinsong, JU Jiang, ZHU Liang, et al. Application of numerical simulation of water transient process in hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):31-37. (in Chinese))
- [13] 郑文玲,张耀哲,杨石磊,等. 异型岔管水力特性的数值模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(11):183-189. (ZHENG Wenling, ZHANG Yaozhe, YANG Shilei, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics in heterotypic bifurcated pipe[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(11):183-189. (in Chinese))
- [14] 丁宁,蔡付林,顾金彤,等. 基于三维VOF方法研究上室体型对调压室涌浪的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2017,39(1):7-10. (DING Ning, CAI Fulin, GU Jintong, et al. Effect of upper chamber shape on surge water level in surge tank based on 3D-VOF method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition), 2017, 39(1):7-10. (in Chinese))
- [15] 陈方亮,王凯,张羽. 抽水蓄能电站调压室阻抗系数的三维数值模拟[J]. 水电能源科学,2007(2):57-60. (CHEN Fangliang, WANG Kai, ZHANG Yu. 3-D numerical simulation on hydraulic resistance coefficient of surge tanks for pumped-storage plant[J]. Hydropower Energy Science, 2007(2):57-60. (in Chinese))
- [16] 杨校礼. 三岔管水流数值模拟及水流特性研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004.
- [17] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3):227-238.
- [18] 王福军. 计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [19] 高学平,李妍,王建华,等. 抽水蓄能电站岔管水力特性数值模拟[J]. 水利水电技术,2012,43(4):41-44. (GAO Xueping, LI Yan, WANG Jianhua, et al. Numerical simulation on hydraulic characteristics of bifurcated pipe of a pumped storage hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(4):41-44. (in Chinese))