

抽水蓄能电站侧式进/出水口隔墩布置对水力特性的影响

徐 准, 吴时强

(南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:运用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 两相流模型,对抽水蓄能电站侧式进/出水口、输水管道和部分上库进行了数值计算,分析了死水位条件下抽水和发电工况的进/出水口隔墩位置对进/出水口流速分布、流道分流系数、水头损失、墩头附近流速分布等水力特性的影响。结果表明:中隔墩后移对发电工况下各流道流速分布、分流系数、进/出口的水头损失几乎无影响;中隔墩后移可改善抽水工况下中隔墩两侧流道的过流流速均匀性和各流道流量分配的均匀性,降低进/出水口的水头损失,但中隔墩后移距离超过进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.3 倍时,改善效果不明显;中隔墩后移进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.44 ~ 0.52 倍,边隔墩后移进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.1 倍,可实现墩头附近局部流速的相对均匀化;中隔墩后移扩散段起始断面宽度的 0.5 倍,边隔墩后移扩散段起始断面宽度的 0.1 倍,可实现抽水蓄能电站进/出水口水力特性的最优化目标。

关键词:抽水蓄能电站;侧式进/出水口;隔墩布置;水力特性;数值模拟;体型优化

中图分类号:TV743

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)03-0021-07

Influence of arrangement of division piers in lateral inlet and outlet of pumped storage plants on hydraulic characteristics//XU Zhun, WU Shiqiang (Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Using the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and the VOF method, numerical simulation of the lateral inlet and outlet, water pipelines and partial upper reservoir of a pumped storage power station was carried out. The effects of division pier layout on the hydraulic characteristics such as the flow rate distribution at the inlet and outlet, the split coefficient of channels, head loss and the flow distribution near the pier head were analyzed under the condition of dead water level. The result shows that, the retro-position of the middle division pier has little influence on the velocity distribution, the split coefficient and the head loss under power generation condition. In the pumping operation mode, the uniformity of velocity and split ratio can be improved, and the head loss can be reduced. However, the improvement is less obvious if the retro-position range is 0.3 times larger than the initial section of the diffuser. The uniformity of the local velocity near the pier head can be realized if the retro-position of the middle division pier and the side division piers is 0.44 to 0.52 times and 0.1 times the width of the initial section of the diffuser, respectively. The optimization of hydraulic characteristics can be achieved when the retro-position of the middle division pier and the side division piers is 0.5 times and 0.1 times the width of the initial section of the diffuser, respectively.

Key words: pumped storage plant; lateral inlet and outlet; division pier layout; hydraulic characteristics; numerical simulation; shape optimization

进/出水口是抽水蓄能电站中连接输水管道和水库的重要建筑物。设计合理的进/出水口能在抽水和发电工况中适应不同的过流流量和流向,能表现出良好的水力特性,降低水头损失。因此优化进/出水口隔墩体型布置,以同时满足两种不同工况要求具有重要意义。

抽水蓄能电站进/出水口水力特性指标主要包

括拦污栅断面平均流速、各流道流速的不均匀系数和各流道的流量分配率^[1]。按照 DL/T 5398—2007《水电站进水口设计规范》要求,拦污栅断面的平均流速应控制在 0.6 ~ 1.0 m/s;各流道水流流速不均匀系数在进流时应小于 1.5,在出流时应小于 2.0;各流道的流量分配率在三流道进/出水口中应保持在 30% ~ 36%,在四流道进/出水口中应保持在

22% ~ 28%。进/出水口体型的设计不当会导致局部高流速、回流、旋涡等不良流态,增大进/出水口的水头损失,甚至造成进/出水口结构破坏,从而影响抽水蓄能电站的经济效益和运行安全。

抽水蓄能电站进/出水口的水力学特性较为复杂,易受到扩散角、扩散段长度、隔墩位置、隔墩墩头形状等多种因素的影响^[2-4]。物理模型试验是常用的研究方法,通过试验可以检验不同工况下电站进/出水口的流速均匀性、流量比、水头损失等水力学指标是否符合设计规范^[5-7],同时对存在的设计缺陷进行改进和优化^[8-9]。但是物理模型试验在研究范围、测量数据全面性和准确性、试验方案多样性等方面存在局限性。

数值模拟是抽水蓄能电站进/出水口体型优化的有效工具。通过对研究对象的参数化建模,可以探讨进/出水口各项体型参数对过栅流速分布、各流道分流比、局部不良流态等水力学特性的影响^[10-13],分析进/出水口和库区的全域流态,调整和优化进/出水口的体型和拦污栅的布置^[14-18]。近年来,响应面法(RSM)、非支配排序遗传选择算法(NSGA-II)等先进算法应用于进/出水口的多目标函数优化,显著提高了研究效率^[19-20]。

本文利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 多相流模型^[21-22],以某抽水蓄能电站上库进/出水口为研究对象,建立四流道三隔墩的进/出水口水流数学模型,分析进/出水口各隔墩布置对进/出水口过栅流速分布、各流道流量分配、水头损失、墩头附近流速分布等水力学特性的影响。

1 进/出水口三维水流数值模型

1.1 控制方程及求解方法

水流数值模拟基于标准 $k-\varepsilon$ 模型,采用 VOF 模型进行液气两相流计算,通过有限体积法对控制方程进行离散,利用 PISO 算法对压力和速度进行耦合计算,具体的控制方程和求解方法可参见文献^[23]。

初始条件设置如下:采用静止流场条件,库区水位设为死水位(640 m),自由液面以下的计算区域水的体积分数赋值为 1,其余参数均按静止流场处理,赋值为 0。

边界条件设置如下:输水管道端部的边界采用流量边界条件,通过调整流量边界的方向和流量值来模拟不同的抽水/发电工况。其中抽水工况下流量为 $109.0 \text{ m}^3/\text{s}$,方向为垂直边界向内;发电工况下流量为 $156.2 \text{ m}^3/\text{s}$,方向为垂直边界向外。上库远离进/出水口的区域进流断面采用均匀流条件,上库

顶部边界设置为压力出口边界条件,其余边界设为固壁边界。

1.2 模型范围与网格划分

某抽水蓄能电站装有 6 台机组,采用两机一洞方式,共有 3 组进/出水口,进/出水口由拦污栅、扩散段、平方段、检修闸门等组成,为典型的三隔墩四流道结构。数值模拟范围包括 3 组进/出水口、输水管道及部分上库库区(图 1)。计算区域均使用非均匀六面体结构化网格划分,其中进/出水口、输水管道及邻近进/出水口的上库库区网格适当加密,其他部分则随着与研究区域距离的增加而逐渐降低网格密度,网格尺寸由 0.15 m 至 3 m 不等,单元数约 400 万(图 2)。

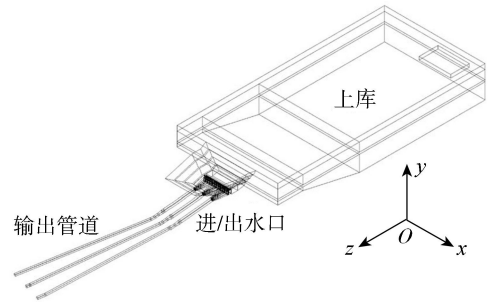


图 1 数学模型计算域示意图

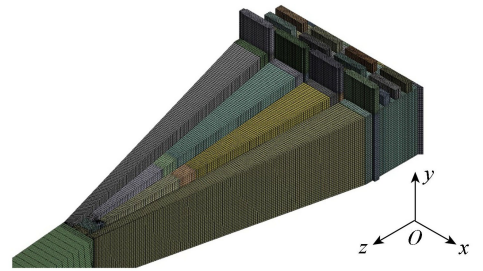


图 2 进/出水口计算网格示意图

选取位于中间的一组进/出水口为研究对象,4 个流道分别标记为 1 号、2 号、3 号、4 号,3 个隔墩分别标记为①、②、③。定义中隔墩(②号隔墩)无量纲相对后移量为 L/b ,边隔墩(①、③号隔墩)无量纲相对后移量为 L'/b ,其中 L 为中隔墩的后移距离, L' 为边隔墩后移距离, b 为进/出水口扩散段起始断面宽度, $b = 5.4 \text{ m}$ (图 3)。为了研究中隔墩布置对进/出水口水力特性的影响,设定中隔墩(②号隔墩)分别后移 0 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、4 m、5 m、6 m(即相对后移量 $L/b = 0, 0.093, 0.185, 0.278, 0.370, 0.463, 0.556, 0.741, 0.926, 1.111$) 10 种布置方案,分析死水位条件下发电与抽水工况时中隔墩后移对进/出水口流场分布、流速分布均匀性、流道分流比等水力特性的影响。

为了便于分析,隔墩墩头附近 1~4 号流道中轴线分别设置纵向断面 A1~A4(图 3),在距离进/出水口流道底板 5 m 处设置水平断面 B(图 4)。

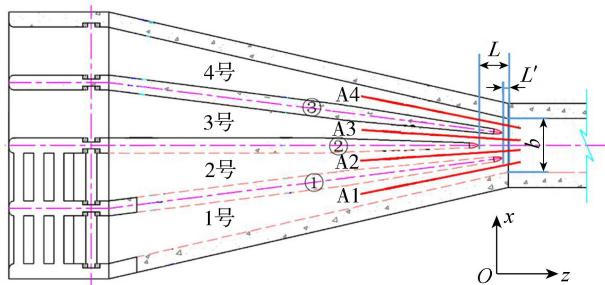


图3 进/出水口水平视图

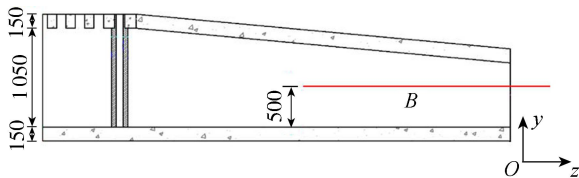


图4 进/出水口纵向断面(单位:cm)

2 模拟结果与分析

2.1 隔墩位置对渠道过流流速的影响

图5和图6分别为中隔墩后移3m时,在发电工况及抽水工况下扩散段末端4个渠道拦污栅断面的流速分布,可见,中间两渠道拦污栅断面的流速分布镜像对称,两侧两渠道拦污栅断面的流速分布也镜像对称,中间渠道拦污栅断面的流速分布与两侧

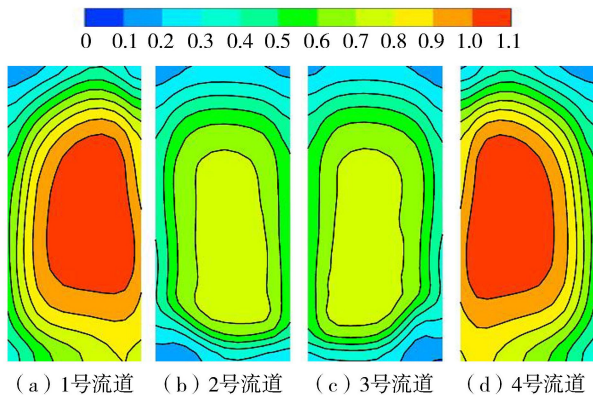


图5 中隔墩后移3m时发电工况下4个渠道拦污栅断面流速分布(单位:m/s)

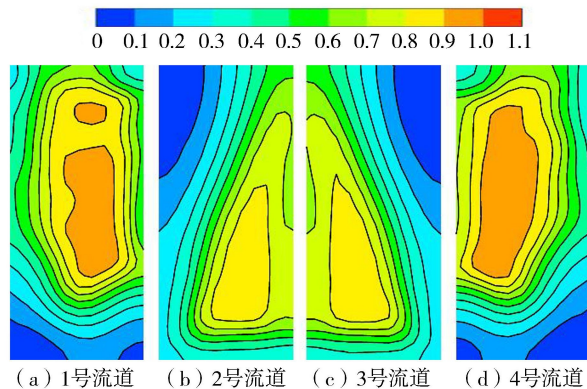


图6 中隔墩后移3m时抽水工况下4个渠道拦污栅断面流速分布(单位:m/s)

渠道存在一定差异。在不同的中隔墩后移布置中,各拦污栅断面的流速分布规律基本一致,因此仅以中隔墩后移3m为例加以分析,此时 $L/b=0.556$ 。

发电工况下,各拦污栅断面流速分布较为均匀。最大流速均发生在渠道中下部,呈椭圆形分布。受边壁影响,流速分布呈中心大、边缘小的特点。1号、4号渠道流速略大于2号、3号渠道,说明1号、4号渠道的过流流量要大于2号、3号渠道。

抽水工况下,各拦污栅断面流态相对紊乱,流速分布差于发电工况。中间渠道拦污栅断面的流速分布较差,较高流速区域集中在各断面的内侧下方角落,呈三角形分布,同时各断面的外侧上方部分均出现了流速小于 0.3 m/s 的较大面积低流速,但无回流存在。相对而言,两侧渠道流速分布好于中间渠道。

可见,发电工况下各渠道流态较好,而抽水工况下各渠道流态普遍差于发电工况,尤其是中隔墩两侧的2号、3号渠道。

为评价断面流速分布的均匀性,定义拦污栅断面流速分布不均匀系数 η_1 如下:

$$\eta_1 = \frac{v_{\max}}{\bar{v}} \quad (1)$$

式中: v_{\max} 为断面上的最大流速; \bar{v} 为断面平均流速。

发电工况及抽水工况下各渠道拦污栅断面 η_1 随 L/b 的变化如图7所示。

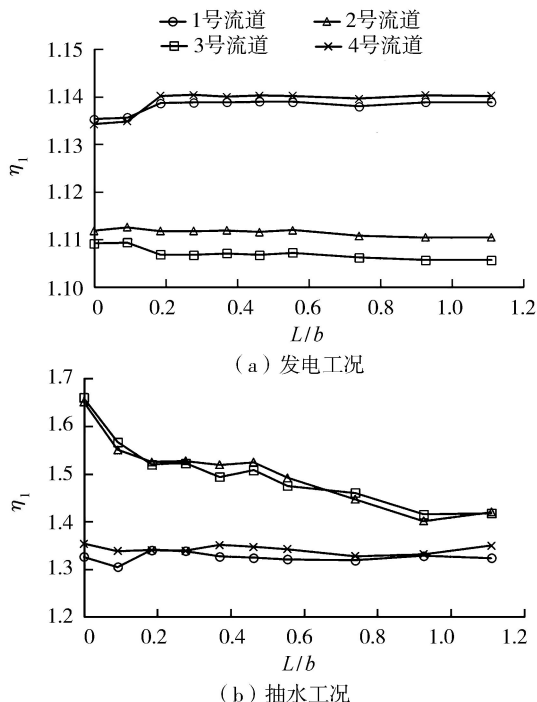


图7 拦污栅断面流速分布不均匀系数与中隔墩相对后移量关系

由图7可见,发电工况下,两侧渠道拦污栅断面的 η_1 维持在1.140左右,中间渠道拦污栅断面的 η_1

维持在 1.110 左右,各流道的流速分布均较均匀,其中中间流道的流速均匀性略优于两侧流道。调整中隔墩的布置, η_1 无明显变化,即中隔墩位置不会影响各流道拦污栅断面的流速均匀性。

抽水工况流速分布规律有别于发电工况。对于中间两流道,后移中隔墩, η_1 值逐渐减小,拦污栅断面流速分布的均匀性得到改善。当 $L/b < 0.2$ 时,中间两流道 η_1 值的下降对中隔墩的后移具有较强的敏感性,后移中隔墩是提升中间两流道流速分布均匀性的有效手段;当 $L/b \geq 0.2$ 时,后移中隔墩仍能改善中间两流道的流速分布均匀性,但是效果不明显。两侧两流道拦污栅断面流速分布不受中隔墩位置影响,其 η_1 值保持在 1.320 ~ 1.325。

流速均匀性可影响进/出水口的水头损失。为评价进/出水口水头损失,定义水头损失系数如下:

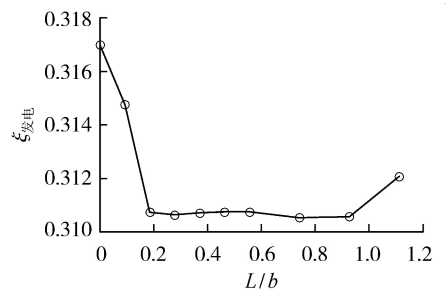
$$\xi_{发电} = \frac{\left(h_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}\right) - \left(h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}\right)}{\frac{v_1^2}{2g}} \quad (2)$$

$$\xi_{抽水} = \frac{\left(h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}\right) - \left(h_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}\right)}{\frac{v_1^2}{2g}} \quad (3)$$

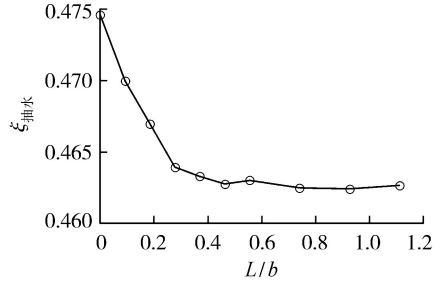
式中: $\xi_{发电}$ 、 $\xi_{抽水}$ 分别为发电和抽水工况下进/出水口水头损失系数; h_1 、 v_1 、 p_1 分别为输水管道与进/出水口连接断面的水位、平均流速、压强; h_0 、 v_0 、 p_0 分别为进/出水口外缘断面的水位、平均流速、压强; α_0 、 α_1 为动能修正系数, $\alpha_0 = 1.0$, $\alpha_1 = 1.0$; ρ 为水的密度; g 为重力加速度。

发电工况及抽水工况下进/出水口水头损失系数随中隔墩相对后移量的变化如图 8 所示。由图 8 可见,发电工况下,当 $L/b > 0.185$ 时, $\xi_{发电}$ 维持在 0.311 左右,调整中隔墩的布置, $\xi_{发电}$ 无明显变化,即中隔墩位置对进/出水口水头损失影响微弱。抽水工况下,当 $L/b < 0.3$ 时,中隔墩位置对进/出水口水头损失影响较大,后移中隔墩可降低进/出口的水头损失;当 $L/b \geq 0.3$ 时,进/出水口水头损失系数基本稳定在 0.463。

可见,发电工况下各流道的流速分布均匀,调整中隔墩位置对各流道拦污栅断面流速分布和进/出水口水头损失几乎无影响;中隔墩位置的调整可改善抽水工况下中间两流道的流速分布均匀性,减少进/出水口水头损失,但是后移的距离超过进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.3 倍时中隔墩后移作用不明显。



(a) 发电工况



(b) 抽水工况

图 8 进/出水口水头损失系数与中隔墩相对后移量的关系

2.2 隔墩位置对进/出水口局部流速的影响

流道隔墩局部水流流态事关局部水头损失大小。在抽水蓄能电站进/出水口中各隔墩墩头附近区域,由于流道宽度的快速收窄,流道形态发生变化,墩头附近出现局部流速剧烈调整区。因此,在抽水蓄能电站进/出水口的设计中,应对隔墩布置进行优化以减缓局部的流速调整,减少局部水头损失。图 9 为抽水工况下中隔墩的后移量 $L = 0.5 \text{ m}$ 、 2.5 m 时水平断面 B 的流速分布。图 10 为抽水工况下中

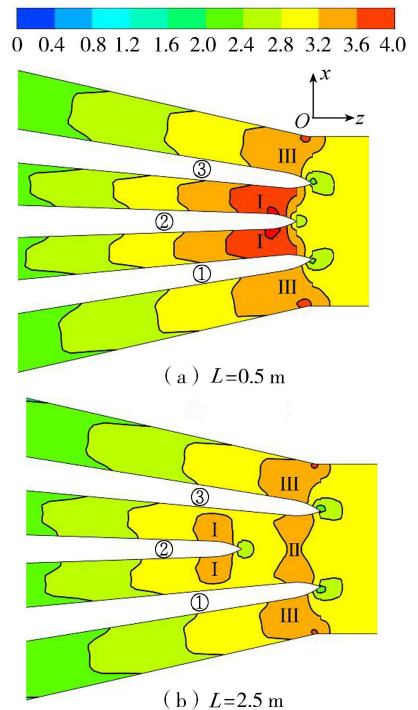


图 9 水平断面 B 流速分布(单位: m/s)

隔墩的后移量 $L=0.5\text{ m}$ 、 2.5 m 时纵向断面 A1、A2 的流速分布。由于 1 号和 4 号流道的流态呈对称分布,2 号和 3 号流道的流态呈对称分布,本文仅给出纵向断面 A1、A2 的流速分布。



图 10 纵向断面 A1、A2 流速分布(单位:m/s)

根据各隔墩的相对位置,可将其附近出现的流速剧烈调整区划分为 3 个区域,其中 I 区位于②号墩墩头附近 2 号、3 号流道中,II 区位于①号墩和③号墩墩头之间的②号墩前部区域,III 区位于①号墩墩头和侧壁及③号墩墩头和侧壁之间。当 $L < 1.5\text{ m}$ ($L/b < 0.28$) 时,由于 3 个隔墩的墩头距离较近,墩头附近仅存在 I 和 III 区;当 $L \geq 1.5\text{ m}$ ($L/b \geq 0.28$) 时,②号墩墩头与相邻的①号墩、③号墩墩头间相对较大的距离可使 II 区从 I 区中分离出来独立存在。仅调整中隔墩的位置可改变中隔墩墩头附近流速分布及 I、II 区的局部流速大小,但是对 III 区流速无影响。

为评价各流速调整区流速调整的剧烈程度,定义进/出水口流速调整系数如下:

$$\eta_2 = \frac{v'_{\max}}{\bar{v}'} \quad (4)$$

式中: η_2 为进/出水口流速调整系数, v'_{\max} 为各流速调整区的最大流速, \bar{v}' 为进/出水口的平均流速。

图 11 为 I、II 区 η_2 与 L/b 的关系,可以看出,抽水或发电工况下,中隔墩后移量的增加可使 I 区流速最大值出现近似线性下降,即增大中隔墩后移距离可有效减小墩头两侧局部流速,但是对 II 区流速最大值影响微小。当 I、II 区流速大小相近时,中隔墩墩头附近流速分布较均匀,流态较好。抽水工

况下 $L/b=0.52$ 时或发电工况下 $L/b=0.44$ 时,中隔墩墩头周边的流态达到最优。因此,在进/出水口布置隔墩时,中隔墩的后移距离可取进/出水口扩散段起始断面宽度的 $0.44 \sim 0.52$ 倍,即可达到中隔墩墩头附近局部流态最佳。

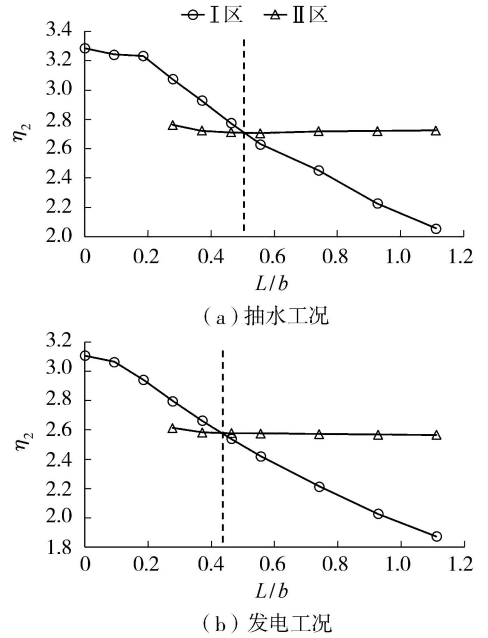


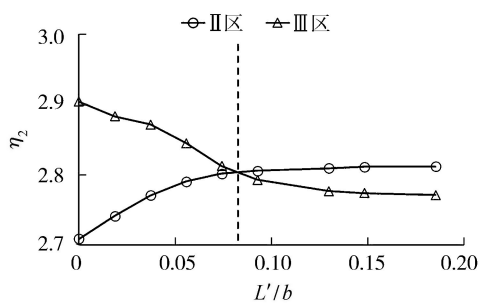
图 11 I、II 区进/出口流速调整系数与中隔墩相对后移量的关系

调整中隔墩位置完成对 I 区、II 区局部流速的优化后,进一步调整边隔墩的位置对 III 区流速进行优化。在中隔墩后移 4 m (即 $L/b=0.741$) 的基础上,假定边隔墩的后移值由 0 m 逐级增至 1 m (即 $L'/b=0 \sim 0.185$)。边隔墩的后移可对 II、III 区局部流速产生影响。II、III 区流速调整系数 η_2 与边隔墩墩头相对后移量 L'/b 的关系如图 12 所示。

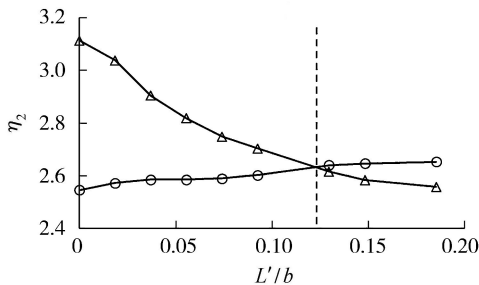
由图 12 可见,抽水工况下,边隔墩的后移可使 III 区流速最大值出现小幅下降,II 区流速最大值出现小幅上升。当 II、III 区流速相近时,边隔墩墩头附近的流速分布较均匀。抽水工况下,当 $L'/b=0.08$ 时,边隔墩墩头周边的流态最优;当 $L'/b > 0.08$ 时,II、III 区流速最大值无明显变化。发电工况下,边隔墩的后移可使 III 区流速最大值出现下降,但是对 II 区流速最大值基本无影响,当 $L'/b=0.12$ 时,II、III 区流速相近,此时边隔墩墩头周边的流态最优。综上,边隔墩的后移距离可取进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.1 倍,即可达到边隔墩墩头附近局部流态最佳。

2.3 隔墩位置对流道分流系数的影响

分流系数可用于表征水流在各孔流道之间分配均匀程度,是抽水蓄能电站进/出水口设计的重要指标之一,在进/出水口的设计中应使各流道的分流系



(a) 抽水工况



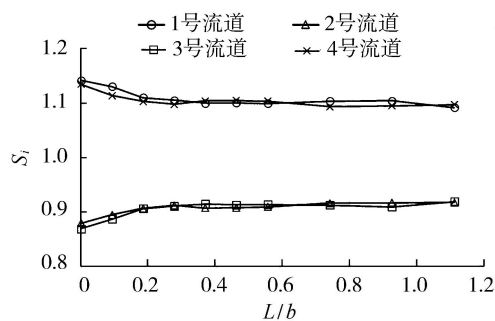
(b) 发电工况

图 12 II、III区流速调整系数与边隔墩相对后移量的关系
数接近 1 以达到各流道过流流量的均衡。分流系数的定义如下：

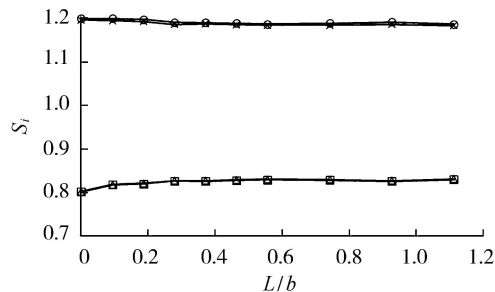
$$S_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} \quad (5)$$

式中： S_i 为第 i 个流道的分流系数； Q_i 为第 i 个流道的过流流量； \bar{Q} 为 4 个流道过流流量的平均值。

图 13 为抽水和发电工况下各流道的分流系数 S_i 与中隔墩相对后移量 L/b 的关系。



(a) 抽水工况



(b) 发电工况

图 13 各流道分流系数与中隔墩相对后移量的关系

抽水工况进/出水口各流道流量分配的均匀性要优于发电工况。抽水工况下,当 L/b 从 0 逐渐增至 0.3 时,中隔墩的后移可使 1 号、4 号流道的分流

系数由 1.135 降至 1.095,2 号、3 号流道的分流系数由 0.865 升至约 0.905,流量分配逐渐均匀;当 $L/b > 0.3$ 时,各流道的分流系数基本不变,各流道的流量分配保持稳定,中隔墩的进一步后移,不再影响流量分配。发电工况下,中隔墩的后移未对各流道的流量分配产生影响,1 号、4 号流道的分流系数稳定在约 1.185,2 号、3 号流道的分流系数稳定在约 0.815。

按照中隔墩后移进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.5 倍,边隔墩后移扩散段起始断面宽度的 0.1 倍布置隔墩位置,计算发现死水位(640 m)和正常水位(681 m)两种水位条件下,抽水和发电工况时两侧流道和中间流道拦污栅断面的流速分布不均匀系数 η_1 、墩头附近 I、II、III 区流速调整系数 η_2 、各流道的分流系数 S_i 均没有明显变化,表明库水位对各系数影响甚微。

3 结论

a. 中隔墩后移对发电工况下各流道流速分布、进/出水口的水头损失几乎无影响;中隔墩后移可有效改善抽水工况下中隔墩两侧流道的过流流速均匀性,降低进/出水口的水头损失,但是后移距离超过进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.3 倍时,改善效果不明显。

b. 隔墩墩头附近易出现局部流速的剧烈调整,将中隔墩后移进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.44 ~ 0.52 倍,边隔墩后移进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.1 倍,可实现墩头附近局部流速的相对均匀化。

c. 中隔墩后移对发电工况下各流道的分流系数几乎无影响;中隔墩后移可改善抽水工况下各流道流量分配的均匀性,但中隔墩后移距离超过进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.3 倍时,分流系数基本不变。

d. 将中隔墩后移扩散段起始断面宽度的 0.5 倍,边隔墩后移进/出水口扩散段起始断面宽度的 0.1 倍,可实现水力学特征的总体最优。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电站进水口设计规范: DL/T 5398—2007 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[2] 高学平, 李岳东, 田野, 等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口流量分配研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(6): 87-94. (GAO Xueping, LI Yuedong, TIAN Ye, et al. Flow distribution in side intake/outlet tunnel of pumped storage

- power stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(6): 87-94. (in Chinese))
- [3] 叶建军. 抽水蓄能电站侧式进出水口出流水流特性研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [4] 高亚楠. 抽水蓄能电站进出水口水力性能优化[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(8): 63-66. (GAO Yanan. Inlet-outlet hydraulic characteristics optimization of pumped storage plant [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(8): 63-66. (in Chinese))
- [5] 杨小亭,张强,邓朝晖. 抽水蓄能电站进出水口模型试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2007, 40(1):66-68. (YANG Xiaoting, ZHANG Qiang, DENG Zhaohui. Inlet/outlet model test of pumped storage power stations [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(1): 66-68. (in Chinese))
- [6] 张从联,朱红华,钟伟强,等. 惠州抽水蓄能电站下库进出水口水工模型试验研究[J]. 人民珠江,2003(6):10-14. (ZHANG Conglian, ZHU Honghua, ZHONG Weiqiang, et al. Hydraulic modelling of inlet/outlet of lower reservoir for Huizhou Pump Storage Plant [J]. Pearl River, 2003(6): 10-14. (in Chinese))
- [7] 张从联,朱红华,钟伟强,等. 惠州抽水蓄能电站上库进出水口水力学模型试验[J]. 水利水电科技进展,2004, 24(6): 13-16. (ZHANG Conglian, ZHU Honghua, ZHONG Weiqiang, et al. Hydraulic model test for inlets and outlets of head reservoir of Huizhou pumped-storage hydroplant [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(6): 13-16. (in Chinese))
- [8] 严根华,陈发展,胡去劣. 进水口漩涡及消涡栅试验研究[C]//唐洪武,李桂芬,王连祥,等. 第三届全国水力学与水利信息学大会论文集. 南京:河海大学出版社, 2007:6.
- [9] 郭雪. 张河湾抽水蓄能电站上、下水库进/出水口布置与体型设计优化[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会 2008 年学术交流会论文集. 北京:中国电力出版社, 2008:79-87.
- [10] 沙海飞,周辉,黄东军. 抽水蓄能电站侧式进/出水口数值模拟[J]. 水力发电学报,2009,28(1):84-88. (SHA Haifei, ZHOU Hui, HUANG Dongjun. Numerical simulation on the side inlet/outlet of pumped storage power station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 84-88. (in Chinese))
- [11] 任晓倩,梅家鹏,陈柏全,等. 抽水蓄能电站侧式进出水口体型优化的数值模拟[J]. 水电能源科学,2014, 32(7): 156-159. (REN Xiaolian, MEI Jiapeng, CHEN Baiquan, et al. Numerical simulation of shape optimization of flank inlet-outlet for pumped storage power station [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 156-159. (in Chinese))
- [12] 熊保锋. 抽水蓄能电站侧式进出水口体型优化的数值模拟 [J]. 科技创新导报, 2016, 13(32): 62-66. (XIONG Baofeng. Numerical modeling on pumped storage plants lateral inlet/outlet structure optimization [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(32): 62-66. (in Chinese))
- [13] 蔡倩雯,蔡付林,王蓉蓉. 抽水蓄能电站上库侧式进/出水口数值模拟[J]. 水电能源科学,2014,32(2):114-117. (CAI Qianwen, CAI Fulin, WANG Rongrong. Numerical simulation on side inlet/outlet of upper reservoir of pumped storage power station [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(2): 114-117. (in Chinese))
- [14] 张正楼,郑亚军,雷兴春,等. 抽水蓄能电站侧式双进/出水口三维数值模拟[J]. 水电能源科学,2009,27(1):158-160. (ZHANG Zhenglou, ZHENG Yajun, LEI Xingchun, et al. 3D numerical simulation of flow in two lateral inlet/outlet at pumped storage plant [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(1): 158-160. (in Chinese))
- [15] 高学平,张家宝,叶飞,等. 抽水蓄能电站进/出水口拦污栅数值模拟[J]. 水利水电技术,2005, 36(2):61-63. (GAO Xueping, ZHANG Jiabao, YE Fei, et al. Numerical simulation of trash rack for a pumped storage plant [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(2): 61-63. (in Chinese))
- [16] 苏曼,高学平. 抽水蓄能电站进/出水口体型优化数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(5):95-98. (SU Man, GAO Xueping. 3D numerical simulation of intake/outlet of pumped storage plant [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 95-98. (in Chinese))
- [17] 钟国栋,刘际军. 某抽水蓄能电站侧式进/出水口体型优化数值模拟[J]. 港工技术,2015,52(3):1-4. (ZHONG Guodong, LIU Jijun. Numerical simulation of side inlet/outlet optimization of pumped-storage station [J]. Port Engineering Technology, 2015, 52(3): 1-4. (in Chinese))
- [18] 韩立. 抽水蓄能电站进/出水口水力设计[C]//曹楚生,邴凤山,邱彬如,等. 抽水蓄能电站工程建设文集. 北京:中国电力出版社,2005:16.
- [19] GAO X, TIAN Y, SUN B. Multi-objective optimization design of bidirectional flow passage components using RSM and NSGA II: a case study of inlet/outlet diffusion segment in pumped storage power station[J]. Renewable Energy, 2018, 115: 999-1013.

(下转第 67 页)