

# 扩散段长度对侧式进/出水口水力特性的影响

刘殷竹, 魏南疆

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**以某上水库无调整段侧式进/出水口为研究对象,采用雷诺应力湍流模型探究了扩散段长度对进/出水口水力特性的影响规律,并从水力学的角度给出了扩散段长度建议值。结果表明:扩散段长度对侧式进/出水口水流运动存在显著影响,扩散段不宜过长或过短;对于进/出水口沿程流速分布,只有在抽水工况下扩散段长度才会对其产生影响,发电工况下基本不存在影响;对于水头损失、各孔口流量配比等其他水力指标,扩散段长度在双向过流时均会对其产生较大影响,随着扩散段长度的增加,各水力指标均先变好再变差;对于无调整段侧式进/出水口体型,当扩散段长度为隧洞直径的5.7~6.0倍时,各水力指标满足规范要求;当扩散段长度为隧洞直径的5.8倍时,进/出水口水力特性得到较大改善,且具有较好的水流流态。

**关键词:**抽水蓄能电站;侧式进/出水口;扩散段;水力特性;数值模拟

**中图分类号:**TV135      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2023)04-0079-07

**Effects of diffusion section length on hydraulic characteristics of side inlet/outlet//LIU Yin Zhu, WEI Nan Jiang (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)**

**Abstract:** Taking the side inlet/outlet of an upper reservoir without adjustment section as the research object, the Reynolds stress model was used to explore the influence of diffusion section length on the hydraulic characteristics of the inlet/outlet, and the recommended value of diffusion section length was given from the perspective of hydraulics. The results show that the length of the diffusion section has a significant influence on the water flow movement of the side inlet/outlet, and the diffusion section should not be too long or too short. The flow velocity distribution along the inlet/outlet can only be affected by the length of the diffusion section under the pumping condition, and there is basically no influence under the power generation condition. For other hydraulic indicators such as head loss and flow distribution at each orifice, the length of the diffusion section will have a greater impact on it when the flow is in both directions, and with the increase of the length of the diffusion section, the hydraulic indicators will first become better and then worse. For the body type of side inlet/outlet without adjustment section, when the length of the diffusion section is 5.7 to 6.0 times the tunnel diameter, the hydraulic indicators meet the requirements of the specification. When the length of the diffusion section is 5.8 times the tunnel diameter, the hydraulic characteristics of the inlet/outlet are greatly improved, and the water flow pattern is better.

**Key words:** pumped storage power plants; side inlet/outlet; diffusion section; hydraulic characteristics; numerical simulation

近年来,我国用电需求量持续增长,在电网系统中具有调峰填谷、使用寿命长、反应迅速等特点的抽水蓄能电站的规划建设也在不断增加<sup>[1-2]</sup>。侧式进/出水口是抽水蓄能电站的重要组成部分,具备双向过流的特点<sup>[3-4]</sup>。NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》规定:分流隔墙将侧式进/出水口的扩散段分成多孔流道,其末端与拦污栅断面相接;扩散段顶板扩张角 $\theta$ 宜在 $3^{\circ}\sim5^{\circ}$ 范围选用,当 $\theta>5^{\circ}$ 时,

宜在扩散段末端接一平顶的调整段。由此可以看出,增设调整段仅是部分进/出水口扩散段顶板扩张角偏大时采取的措施,目的是为了防止拦污栅断面出现反向流速区等不利的水流流态。实际上,抽水蓄能电站中存在着相当数量的无调整段侧式进/出水口,例如浙江磐安抽水蓄能电站上水库侧式进/出水口、河南五岳抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口、海南琼中抽水蓄能电站上库侧式进/出水口、广

基金项目:国家自然科学基金项目(52179077)  
作者简介:刘殷竹(1992—),女,助理研究员,博士,主要从事水力学研究。E-mail:yz\_liu@tju.edu.cn  
通信作者:魏南疆(1997—),男,硕士研究生,主要从事工程水力学研究。E-mail:wnj839419516@163.com

东阳江抽水蓄能电站上水库侧式进/出水口等。无调整段侧式进/出水口由于缺乏调整段对水流均匀性的调整作用,扩散段长度对其水力特性的影响比有调整段的进/出水口更加敏感和重要。但目前设计规范中缺乏无调整段侧式进/出水口的扩散段长度的建议值。因此,研究无调整段侧式进/出水口扩散段长度对其水力特性的影响具有较大的实用价值。

水工物理模型试验方法是研究侧式进/出水口水力特性最基本的手段。蔡付林等<sup>[5]</sup>通过水工物理模型试验分析了侧式进/出水口扩散段中的分流墩布置方式对水力特性的影响,认为分流墩布置方式及墩头形状是进/出水口水力特性的重要影响因素。孙双科等<sup>[6]</sup>采取水工物理模型试验方法,发现调整扩散段布置体型可以消除拦污栅断面的反向流速区。张兰丁<sup>[7]</sup>采用水工物理模型试验方法,提出使扩散段中的分流墩等间距布置能够对流量均匀分配起到更有利的作用。章军军等<sup>[8]</sup>对侧式短进/出水口进行了物理模型试验,并在试验基础上对原型体的扩散段等进行了一定的优化,解决了试验工况中水头损失系数与流量不均匀系数较大的问题。

数值模拟方法由于能够快速、准确地对水流运动进行模拟,近年来得到了广泛应用。Cai 等<sup>[9-10]</sup>选取不同的湍流模型,分别研究其在侧式进/出水口双向水流运动建模计算中的精度,结果表明,雷诺应力湍流模型(Reynolds stress model, RSM)的拟合精度最高。苏曼等<sup>[11]</sup>对进/出水口优化体型开展数值模拟,发现在扩散段末端增设适宜长度的调整段可以很大程度上提升水流的均匀性,从而使水流流态变好。高学平等<sup>[12-13]</sup>建立了进/出水口体型自动优化平台,能够以数值模拟方法快速自动得到目标优化体型。Ye 等<sup>[14]</sup>采取数值模拟方法对侧式进/出水口水流运动展开分析,发现扩散段体型和调整段长度均对水头损失系数有一定影响。任晓倩等<sup>[15]</sup>通过数值模拟方法对扩散段导流墩的位置及中、边孔的扩散角进行了优化调整,解决了流量分配不均的问题。徐准等<sup>[16]</sup>全面分析了进/出水口扩散段内隔墩位置的改变对双向流动水力特性的影响。毛长贵<sup>[17]</sup>分析了侧式进/出水口扩散段末端的孔口高度对水流运动的影响,指出在双向流动时孔口高度对流量分配、拦污栅断面流分布等均存在一定影响。沙海飞等<sup>[18]</sup>通过数值模拟方法对分流墩布置方式进行了优化,给出了进/出水口扩散段中适宜的分流墩间距比。王晨茜等<sup>[19]</sup>采用数值模拟方法对扩散段体型与进/出水口流动分离现象之间的关系进行了探讨,指出扩散段的顶板扩张角是进/出水口扩散段末端产生流动分离现象的主要影响因素,并给出

了适宜的顶板扩张角的范围。叶飞等<sup>[20]</sup>使用数值模拟方法对侧式进/出水口恒定有压扩散流局部非稳态现象进行了深入分析,发现较长的扩散段更容易在进/出水口处形成流动分离现象。李广宁<sup>[21]</sup>选取数值模拟方法,对侧式进/出水口扩散段体型展开了研究,发现压低扩散段顶板扩张角能够在更大程度上抑制甚至消除拦污栅断面的负流速区。

上述研究大多针对有调整段侧式进/出水口扩散段体型、内部分流墩布置、孔口高度等体型参数对进/出水口水力特性的影响,鲜有关于扩散段长度对无调整段侧式进/出水口水力特性的分析研究。无调整段侧式进/出水口相较于有调整段的体型来说,能够很大程度上缩短进/出水口的整体长度,使得工程开挖量减小,工程造价降低。本文以某上水库无调整段侧式进/出水口为研究对象,采用 RSM 深入分析在双向过流条件下不同扩散段长度对进/出水口水力特性的影响规律,以期从水力学角度给出扩散段长度建议值。

## 1 研究方法

图 1 为某上水库侧式进/出水口体型图。沿出流方向(水从进/出水口出入库区)依次包括:渐变段 1、闸门井段、渐变段 2、扩散段、防涡梁段等。输水隧洞直径  $D$  为 7.8 m,扩散段长度  $L$  为 39.0 m,顶板扩张角  $\theta$  为  $3.2^\circ$ ,总平面扩散角  $\beta$  为  $35^\circ$ ,防涡梁段长 10.22 m,进/出水口采用 3 隔墩 4 孔口布置,孔口宽度 6.4 m,高度 10 m。

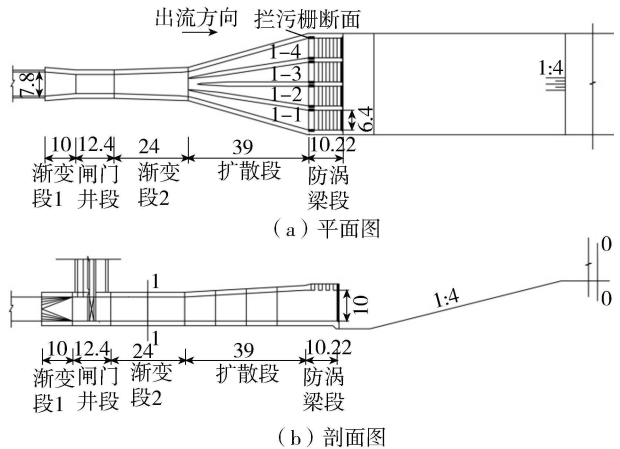


图 1 侧式进/出水口体型(单位:m)

### 1.1 控制方程及求解方法

本文研究对象为不可压缩流体,控制方程为连续性方程和雷诺方程,具体方程参见文献[22]。由于雷诺方程中有雷诺应力项,需要封闭才能求解,因此需要引入湍流模型。RSM 针对雷诺应力的所有分量构造输运方程,能较好地模拟水流在转弯段及

进/出水口内部的流动,因此本文采用 RSM 对雷诺方程进行封闭。RSM 的输运方程、湍动能和耗散率方程也参见文献[22]。

控制方程解法采用有限体积法,空间离散采用二阶迎风格式,压力与速度的耦合求解采用 SIMPLE 算法。

1.2 边界条件及网格划分

计算区域有部分隧洞、侧式进/出水口、部分上水库库区等。进/出水口出流时,水由隧洞流向进/出水口,再由进/出水口流向库区。库区边界依据水库水位按静水压强给出,隧洞边界依据流量按平均流速给出。固壁边界高度与水位一致,采用无滑移条件,水库液面为自由表面。进/出水口体型采用六面体结构化网格,进/出水口附近网格尺寸 0.3 m,其余部位网格尺寸 0.4 m,网格总数约 1 500 万。计算区域及模型网格如图 2 所示。

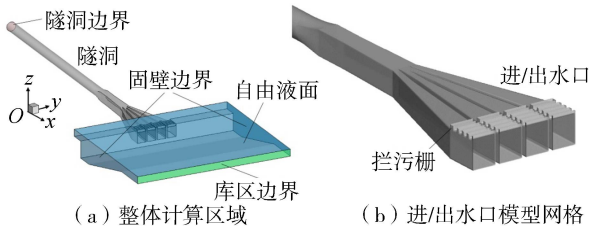


图 2 计算区域及模型网格

1.3 模型验证

对已进行过物理模型试验的抽水蓄能电站侧式进/出水口进行数值模拟,验证三维数学模型的合理性。计算工况为死水位时淹没水深 20.5 m,抽水工况(水从进/出水口流出进入水库)流量 161.2 m³/s,发电工况(水从水库流入进/出水口)流量 123.7 m³/s。图 3 和图 4 为抽水和发电工况下中、边孔拦污栅断面流速分布,可见数值模拟结果与物理试验结果拟合较好,RSM 可以用于侧式进/出水口水力特性研究。

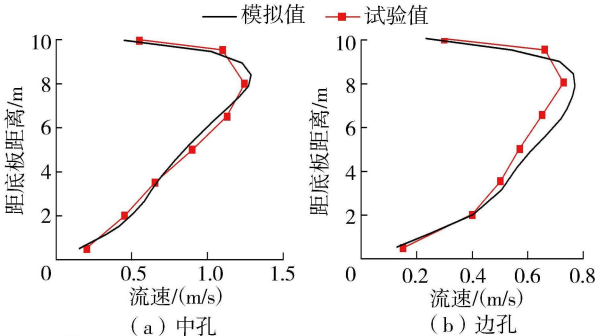


图 3 抽水工况拦污栅断面流速分布

2 模拟结果与分析

利用经试验验证的数学模型对无调整段侧式

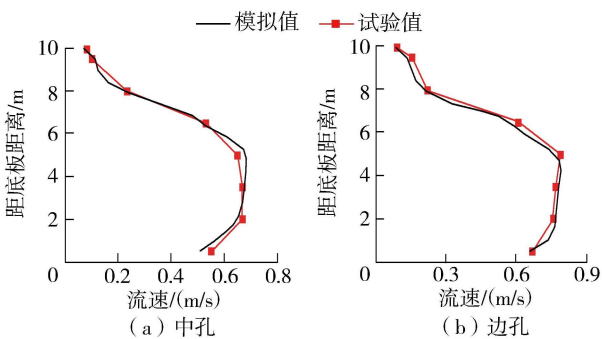


图 4 发电工况拦污栅断面流速分布

进/出水口水力特性进行三维数值模拟,分析扩散段长度对其水力特性的影响。通过查阅规范及总结大量实际工程中无调整段侧式进/出水口的体型参数,选取不同扩散段长度  $L$  对抽水和发电工况下进/出水口水力特性的影响规律进行深入研究,从而得到符合水力学要求的扩散段长度。

在保证孔口面积不变的前提下,扩散段长度取  $5.0D \sim 6.0D$ ,间隔  $0.1D$ ,共 11 组,各计算体型几何参数列于表 1。本文主要针对死水位情况进行研究,因为在实际工程中,死水位通常是最不利水位,当水位增加(如正常蓄水位)时,从以往模型试验和数值模拟结果来看,侧式进/出水口的水头损失、拦污栅断面流速分布、各孔口流量配比等水力特性基本不变。除此之外,由于进/出水口为对称体型,中间两流道、边上两流道各自结果基本相同,为避免冗余,本文以边孔 1-1、中孔 1-2 为例给出计算结果。

表 1 各计算体型几何参数

| $L/D$ | 孔口高度/m | 孔口宽度/m | 顶板扩张角/(°) | 平面扩散角/(°) |
|-------|--------|--------|-----------|-----------|
| 5.0   | 10.0   | 6.4    | 3.2       | 35        |
| 5.1   | 9.8    | 6.5    | 3.0       | 35        |
| 5.2   | 9.7    | 6.6    | 2.7       | 35        |
| 5.3   | 9.6    | 6.7    | 2.5       | 35        |
| 5.4   | 9.4    | 6.8    | 2.2       | 35        |
| 5.5   | 9.3    | 6.9    | 2.0       | 35        |
| 5.6   | 9.2    | 7.0    | 1.8       | 35        |
| 5.7   | 9.1    | 7.1    | 1.6       | 35        |
| 5.8   | 8.9    | 7.2    | 1.4       | 35        |
| 5.9   | 8.8    | 7.3    | 1.2       | 35        |
| 6.0   | 8.7    | 7.4    | 1.1       | 35        |

2.1 进/出水口水头损失

进/出水口水头损失为库水位  $Z_0$  (图 1(b) 的 0—0 断面) 至渐变段上游 1.5 倍洞径处 (图 1(b) 的 1—1 断面) 之间的水头损失。进出口水头损失系数  $\xi$  可表示为

$$\xi = \frac{2gh_t}{\alpha \bar{v}^2} \tag{1}$$

式中: $g$  为重力加速度; $\alpha$  为动能修正系数, $\alpha = 1$ ; $\bar{v}$  为隧洞段的断面平均流速; $h_t$  为水头损失,抽水工

况  $h_f = Z_1 - Z_0 + \alpha v^2 / 2g$ , 发电工况  $h_f = Z_0 - Z_1 - \alpha v^2 / 2g$ 。

图 5 为  $L/D$  为 5.2、5.4、5.6、5.8、6.0 时的侧式进/出水口体型对应的水头损失系数。由图 5 可知, 随着扩散段长度的变化, 水头损失系数并不是随之单调变化。抽水工况下, 当  $L/D < 5.8$  时, 水头损失系数随着扩散段长度的增加逐渐减小; 当  $L/D = 5.8$  时, 水头损失系数达到最小值; 当  $L/D > 5.8$  时, 水头损失系数随着扩散段长度的增加又逐渐增大。发电工况的水头损失系数变化趋势与抽水工况相似, 但变化幅度远小于发电工况。

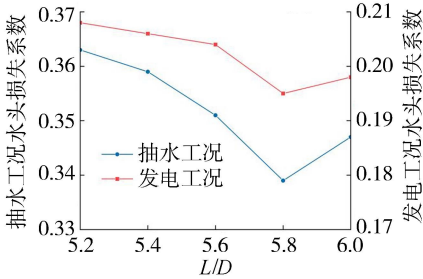


图 5 进/出水口水头损失系数

由此可见, 扩散段长度对侧式进/出水口的水头损失系数存在一定的影响, 并且抽水工况下扩散段长度变化对进/出水口水头损失影响的敏感程度大于发电工况。

2.2 进/出水口沿程流态

为直观描述不同扩散段长度的侧式进/出水口内部流动规律, 在进/出水口内部选取了扩散段进口断面、扩散段中端断面、扩散段末端断面和拦污栅断面共 4 个断面展示其沿程流速分布。图 6 为侧式进/出水口内部沿程流速断面布置, 图 7、图 8 分别为抽水和发电工况下不同  $L/D$  的侧式进/出水口内部各个断面的流速分布云图。

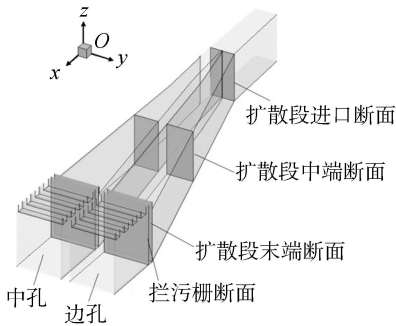


图 6 进/出水口内部流速断面布置

从抽水工况各个断面  $x$  方向的流速云图 (图 7) 可以看出, 扩散段内部中孔流速大于边孔流速, 中孔的主流明显且靠近中墩, 远离中墩的壁面存在低流速区; 边孔的主流靠近边墩, 远离边墩的壁面存在低流速区。各个断面垂向流速大小分布均大致表现为由孔口中心逐渐向上下递减的规律, 当  $L/D = 5.2$

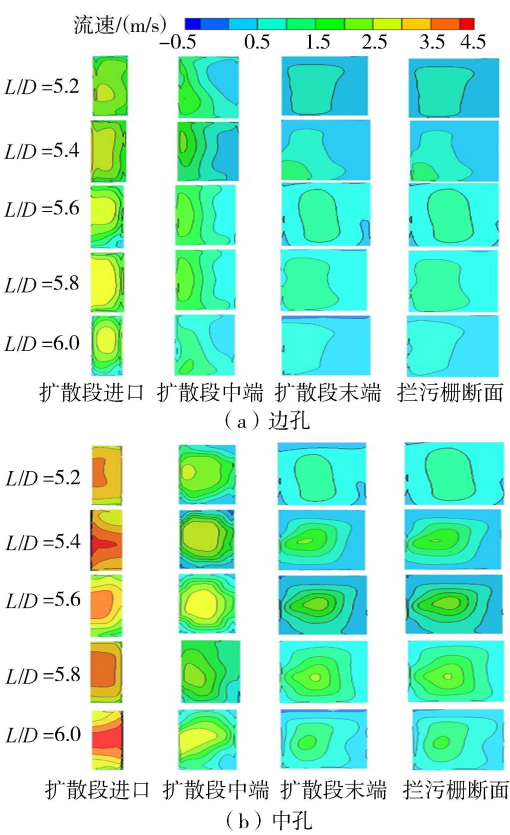


图 7 抽水工况进/出水口内部流速分布

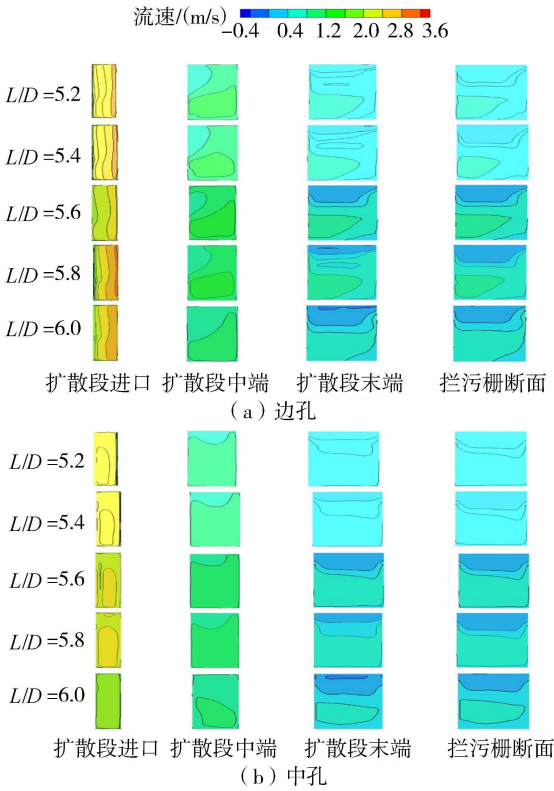


图 8 发电工况进/出水口内部流速分布

时, 中孔扩散段顶部还出现了小范围的反向流速区, 随着扩散段长度的变化, 流动分离现象逐渐减弱直至消失。顺水流方向主流自隧洞流入进/出水口, 水流逐渐扩散, 各孔口平均流速沿程逐渐降低。水流

到达拦污栅断面后流速分布也趋于均匀。结果表明,抽水工况下,不同扩散段长度的侧式进/出水口体型各典型断面内部流速场存在一定差异,当 $L/D=5.8$ 时,中、边孔流速均分布均匀,整体流态较好。

从发电工况各个断面 $x$ 方向的流速云图(图8)可以看出,顺水流方向水流自进/出水口流入隧洞,水流逐渐收缩,各孔口流速沿程越来越大,也逐渐趋于均匀。各个断面垂向流速大小分布均大致呈现由孔口底部逐渐向顶部递减的规律。以扩散段中端断面为例,经过扩散段的收缩,沿水流方向垂向平均流速值逐渐增大,水流的流速分布不均匀程度逐渐降低。结果表明,发电工况下,不同扩散段长度的侧式进/出水口体型各典型断面内部流速场基本相似,沿程流速分布也大致相同,可以认为扩散段长度对侧式进/出水口内部流速场分布的影响较小。

2.3 拦污栅断面流速分布

为保障侧式进/出水口拦污栅结构的稳定和安全,避免拦污栅受到振动破坏,拦污栅断面流速分布应均匀平顺。图9和图10分别为抽水和发电工况下不同 $L/D$ 的拦污栅断面中垂线的流速分布图(图中 $Y$ 为测点高度, $H$ 为孔口高度, $v$ 为测点流速, $\bar{v}$ 为隧洞平均流速)。流速不均匀系数(最大流速/平均流速)可以定量描述断面流速分布的均匀程度,中、边孔拦污栅断面流速不均匀系数随扩散段长度的变化趋势如图11所示。

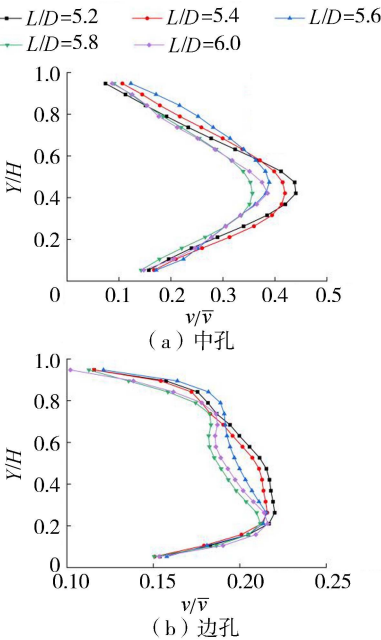


图9 抽水工况拦污栅断面流速分布

由图9可知,抽水工况下,中孔拦污栅断面主流明显,主流位于孔口中部,随着扩散段长度的增加,孔口最大流速呈先减小后增加的变化规律;边孔拦

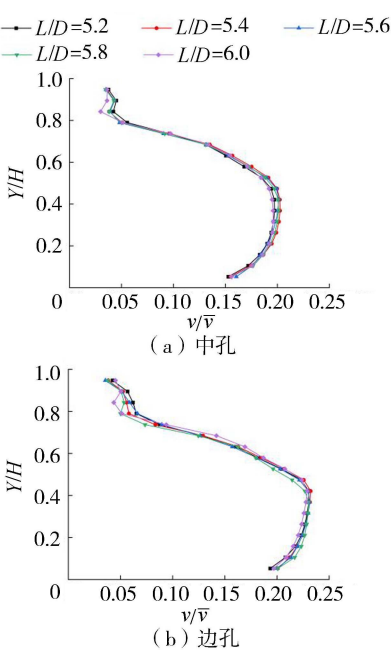


图10 发电工况拦污栅断面流速分布

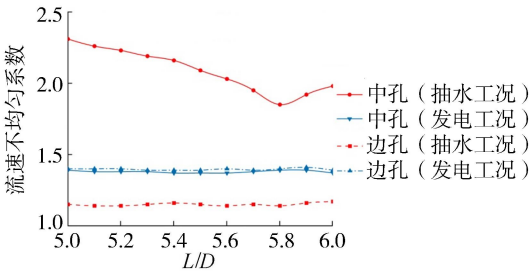


图11 拦污栅断面流速不均匀系数

污栅断面流速分布规律基本一致,整体均匀性较好。由图10可知,发电工况下,不同扩散段长度的侧式进/出水口中、边孔拦污栅断面流速分布规律均基本相似,整体流速分布均匀。从图11可以看出,抽水工况下,当 $L/D<5.8$ 时,中孔流速不均匀系数与扩散段长度之间呈负相关关系;当 $L/D>5.8$ 时,两者又会呈现一定的正相关关系。当 $L/D=5.0\sim5.8$ 时,中孔流速不均匀系数由2.31递减至1.85,降幅达19.9%;当 $L/D=5.8\sim6.0$ 时,中孔流速不均匀系数由1.85递增至1.98,增幅达7.0%。而边孔流速不均匀系数基本不随扩散段长度的变化而变化,其流速不均匀系数大致相同且较小。发电工况下,随着扩散段长度的变化,中、边孔流速不均匀系数均保持在1.40左右,孔口流速分布均匀。

由此可知,进/出水口扩散段长度的变化仅对抽水工况下的拦污栅断面流速分布存在一定影响,在发电工况下基本不存在影响。由扩散段长度对抽水工况中孔流速不均匀系数的影响规律可知,扩散段长度只有在一定的范围内,才能使孔口流速不均匀系数满足NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》中侧式进/出水口的各孔口拦污栅断面流速不

均匀系数小于 2.0 的要求。即当  $L/D=5.7 \sim 6.0$  时,中、边孔流速不均匀系数均符合规范要求,其中  $L/D=5.8$  时孔口流速不均匀系数最小,流速分布最均匀。

2.4 进/出水口流量分配

图 12 为中、边孔流量配比、流量不均匀程度随扩散段长度的变化趋势图。由图 12 可知,抽水工况下,当  $L/D<5.8$  时,随着扩散段长度的增加,中、边孔流量不均匀程度均呈现单调递减的趋势;当  $L/D>5.8$  时,随着扩散段长度的增加,各孔口流量不均匀程度又逐渐缓慢增加。以中孔为例,当  $L/D=5.0 \sim 5.8$  时,流量配比处于 26.01% ~ 30.11% 之间,流量不均匀程度由 28.48% 递减到 8.28%,降幅达 70.9%,整体降幅明显;当  $L/D=5.8 \sim 6.0$  时,流量配比处于 26.01% ~ 26.49% 之间,流量不均匀程度由 8.28% 递增到 9.46%,增幅达 14.2%。发电工况下中、边孔流量不均匀程度随扩散段长度的变化趋势与抽水工况下大致相同,均是先减小再缓慢增加,但发电工况下中、边孔流量不均匀程度变化幅度远远小于抽水工况。以边孔为例,当  $L/D=5.0 \sim 5.8$  时,流量配比处于 26.36% ~ 27.95% 之间,流量不均匀程度由 14.51% 递减到 6.69%,降幅达 53.9%;当  $L/D=5.8 \sim 6.0$  时,流量配比处于 26.36% ~ 26.75% 之间,流量不均匀程度由 6.69% 递增到 8.61%,增幅达 28.7%。

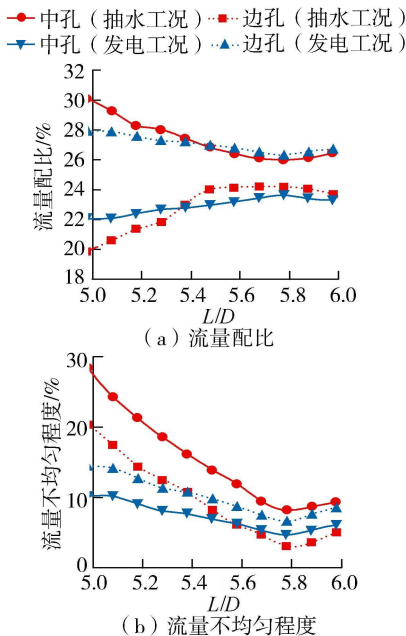


图 12 扩散段长度对进/出水口流量配比和不均匀程度的影响

由此可以看出,随着扩散段长度的增加,双向过流条件下,中、边孔流量不均匀程度均先减小后增大,并且抽水工况下流量不均匀程度对扩散段长度

的响应比发电工况更为敏感。当  $L/D=5.7 \sim 6.0$  时,中、边孔流量不均匀程度均符合 NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》中孔口流量不均匀程度小于 10% 的要求,其中  $L/D=5.8$  时孔口流量不均匀程度最小,流量分配最均匀。

3 结 论

a. 抽水工况下,当  $L/D<5.8$  时,随着扩散段长度的增加,侧式进/出水口的水头损失系数、流速不均匀系数、各孔口流量不均匀程度等均不断减小;当  $L/D>5.8$  时,随着扩散段长度的增加,进/出水口各水力指标数值又有所增加。

b. 发电工况下,不同扩散段长度的侧式进/出水口沿程流速分布规律基本相似,但水头损失系数、流量不均匀程度等均先减小后增加,即扩散段长度对发电工况下进/出水口的水头损失及流量分配存在一定影响,对流速分布基本不存在影响。

c. 扩散段长度对无调整段侧式进/出水口的水力特性的影响变化较为敏感,扩散段过长或过短均会对进/出水口水力特性存在不利影响。当  $L/D=5.7 \sim 6.0$  时,进/出水口水力特性满足设计规范要求。当  $L/D=5.8$  时,侧式进/出水口各水力指标均较优且具有良好的水流流态。

参考文献:

[ 1 ] REHMAN S, AL-HADHRAMI L M, ALAM M. Pumped hydro energy storage system: a technological review [ J ]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 586-598.

[ 2 ] KONG Yigang, KONG Zhigang, LIU Zhiqi, et al. Pumped storage power stations in China: the past, the present, and the future [ J ]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 720-731.

[ 3 ] 龚成勇, 李仁年, 何香如, 等. TRIZ 创新方法剖析抽水蓄能电站进/出水口设计 [ J ]. 水力发电学报, 2020, 39 ( 2 ): 16-24. ( GONG Chengyong, LI Rennian, HE Xiangru, et al. Analysis on flow intake-outlet design of pumped storage power station using TRIZ innovation method [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 ( 2 ): 16-24. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 邱彬如, 刘连希. 抽水蓄能电站工程技术 [ M ]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[ 5 ] 蔡付林, 胡明, 张志明. 双向水流侧式进/出水口分流墩研究 [ J ]. 河海大学学报 ( 自然科学版 ), 2000, 28 ( 2 ): 73-77. ( CAI Fulin, HU Ming, ZHANG Zhiming. Study on guide piers in flank inlet-outlet with double flow directions [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2000, 28 ( 2 ): 73-77. ( in Chinese ) )

- [ 6 ] 孙双科,柳海涛,李振中,等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口拦污栅断面的流速分布研究[J]. 水利学报,2007,38(11):1329-1335. (SUN Shuangke, LIU Haitao, LI Zhenzhong, et al. Study on velocity distribution behind the trashrack in lateral intake/outlet of pumped storage power station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(11):1329-1335. (in Chinese))
- [ 7 ] 张兰丁. 响水涧抽水蓄能电站上、下库进(出)水口分流特性研究[J]. 水利水电科技进展,2010,30(6):48-52. (ZHANG Landing. Flow-dividing characteristics of intakes/outlets in upper and lower reservoirs of Xiangshuijian Pumped Storage Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (6):48-52. (in Chinese))
- [ 8 ] 章军军,毛根海,程伟平,等. 抽水蓄能电站侧式短进/出水口水力优化研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2008,42(1):188-192. (ZHANG Junjun, MAO Genhai, CHENG Weiping, et al. Hydraulic shape optimization on lateral inlet/outlet of pump-storage plant [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008,42(1):188-192. (in Chinese))
- [ 9 ] CAI Fulin, ZHOU Jianxu, HU Ming, et al. 3-D numerical simulation of hydraulic characteristics of lateral intake of pumped storage plant [M]//ZHANG Changkuan, TANG Hongwu. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering. Berlin:Springer,2009.
- [10] CAI Fulin, LI Xiaoyan. Comparison of numerical simulation accuracy for characteristics of pumped storage intake [C]//Proceedings of 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing: IEEE,2009:1-5.
- [11] 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))
- [12] 高学平,李建国,孙博闻,等. 利用多岛遗传算法的侧式进/出水口体型优化研究[J]. 水利学报,2018,49(2):186-194. (GAO Xueping, LI Jianguo, SUN Bowen, et al. Optimization of the shape of lateral intake/outlet using multi-island genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(2):186-194. (in Chinese))
- [13] GAO Xueping, TIAN Ye, SUN Bowen. Shape optimization of bi-directional flow passage components based on a genetic algorithm and computational fluid dynamics [J]. Engineering Optimization, 2018, 50 (8):1287-1303.
- [14] YE Fei, GAO Xueping. Numerical simulations of the hydraulic characteristics of side inlet/outlets [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23 (1):48-54.
- [15] 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 Xiaoqian, 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))
- [16] 徐淮,吴时强. 抽水蓄能电站侧式进/出水口隔墩布置对水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):21-27. (XU Zhun, WU Shiqiang. Influence of arrangement of division piers in lateral inlet and outlet of pumped storage plants on hydraulic characteristics [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(3):21-27. (in Chinese))
- [17] 毛长贵. 清原水库侧式进/出水口水力特性影响因素研究[D]. 天津:天津大学,2018.
- [18] 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))
- [19] 王晨茜,张晨,张翰,等. 侧式进/出水口流动分离现象研究[J]. 水力发电学报,2017,36(11):73-81. (WANG Chenxi, ZHANG Chen, ZHANG Han, et al. Flow separation in side inlets/outlets of pumped storage power stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11):73-81. (in Chinese))
- [20] 叶飞,周振民,高学平,等. 恒定有压扩散流局部非稳态现象数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2014,33(4):178-185. (YE Fei, ZHOU Zhenmin, GAO Xueping, et al. Investigation of local unsteady phenomena in pressurized steady diffusion flows by numerical simulation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(4):178-185. (in Chinese))
- [21] 李广宁. 抽水蓄能电站上水库侧式进/出水口水力特性研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [22] 高学平,陈思宇,朱洪涛,等. 反坡段对侧式进/出水口水力特性影响研究[J]. 水力发电学报,2021,40(5):87-98. (GAO Xueping, CHEN Siyu, ZHU Hongtao, et al. Study on the influences of reverse slope section on hydraulic characteristics of side inlet/outlet [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (5):87-98. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-30 编辑:俞云利)