

抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段长度优化

高学平¹, 廉 想¹, 朱洪涛¹, 陈培伦², 王维娜², 刘殷竹¹

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司)

摘要:为优化抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段长度,以亚布力抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口为研究对象,在进/出水口总长度不变的前提下,采用数值模拟方法探讨调整段长度与扩散段长度之比对侧式进/出水口水力特性的影响。结果表明,对于出流工况,随着调整段长度与扩散段长度之比的增大,中孔拦污栅断面主流位置由孔口中上部逐渐降低至孔口底部,边孔拦污栅断面主流位置变化不明显;中孔和边孔拦污栅断面流速不均匀系数均呈先减小后增大的趋势;当调整段长度为扩散段长度的 50% 时,拦污栅断面流速不均匀系数最小,拦污栅断面无负流速。对于进流工况,进/出水口的各项水力指标基本不受调整段长度变化的影响。因此,在进/出水口总长度不变的情况下,当调整段长度为扩散段长度的 50% 时,进/出水口各项水力指标均相对更优。

关键词:抽水蓄能电站;侧式进/出水口;调整段;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(2026)05-0067-07

Optimization of adjustment-section length for side inlet/outlet of pumped storage power plants//Gao Xueping¹, Lian Xiang¹, Zhu Hongtao¹, Chen Peilun², Wang Weina², Liu Yinzhu¹(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University*; 2. *POWERCHINA Beijing Engineering Corporation Limited*)

Abstract: To optimize the adjustment-section length for the side inlet/outlet of a pumped storage power station, this paper takes the side inlet/outlet of the lower reservoir of the Yabuli Pumped Storage Power Station as its research object, and uses the numerical simulation method to discuss the influence of the ratio of the adjustment-section length to the diffusion-section length on the hydraulic characteristics of the side inlet/outlet, while keeping the total length of the inlet/outlet fixed. Under the outflow condition, the results show that as the ratio of adjustment-section to diffusion-section length rises, the mainstream position at the trash rack section of the middle channel gradually shifts from the upper-middle part of the orifice to the bottom of the orifice, while that of the side channel does not change significantly. The velocity non-uniformity coefficients at the trash rack section of both the middle and side channels first decrease and then increase. When the adjustment-section length is 50% of the diffusion-section length, the velocity non-uniformity coefficient at the trash rack section reaches its minimum, and there is no negative velocity at the trash rack section. Under the inflow condition, the hydraulic indices of the inlet/outlet are essentially unaffected by variations in adjustment-section length. Therefore, with the total length of the inlet/outlet fixed, all hydraulic indices of the inlet/outlet are relatively better when the adjustment-section length is 50% of the diffusion-section length.

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

抽水蓄能电站以其突出的综合效益和工程实践优势,在电力系统调度中占据重要地位,为电网安全平稳运行提供了可靠保障^[1-2]。作为抽水蓄能电站输水系统的关键组成部分,进/出水口按照结构形式可分为侧式与竖井式两种,工程中以侧式进/出水口居多^[3-4]。侧式进/出水口是控制水流进水库的通道,具有双向过流的特点^[5],其主要由扩散段、调整

段、防涡梁段三部分组成^[6]。实际工程中,受地形条件及隧洞空间布局的制约,侧式进/出水口总长度一般调整余地较小。因此,在保证侧式进/出水口总长度不变的前提下,如何确定调整段长度以获得较优的进/出水口水力特性,是设计进/出水口必须考虑的问题。

扩散段对侧式进/出水口内部的水力特性存在

基金项目:国家自然科学基金项目(52179077)
作者简介:高学平(1962—),男,教授,博士,主要从事水工水力学研究。E-mail:xpgao@tju.edu.cn
通信作者:朱洪涛(1995—),男,助理研究员,博士,主要从事水工水力学研究。E-mail:htzhslx@tju.edu.cn

显著影响。扩散段的体型参数有扩散段长度、顶板扩张角、水平扩散角、内部分流隔墩间距等。刘殷竹等^[7]提出当扩散段长度为隧洞直径的5.8倍时,侧式进/出水口可不设调整段。顶板扩张角主要影响拦污栅断面垂向流速分布,顶板扩张角越小,扩散段内越不易产生流动分离,拦污栅断面越不容易出现负流速;顶板扩张角越大,拦污栅断面越容易出现负流速^[8-9]。一般在拦污栅断面孔口面积不变的情况下,扩散段采用较小的顶板扩张角和较大的水平扩散角可以获得更优的水力特性^[10]。扩散段内部分流隔墩间距和隔墩缩进方式分别影响进/出水口各孔口的流量分配和拦污栅断面流速分布。已有研究明确了较优的隔墩布置方案:中间的分流隔墩缩进隧洞直径的50%^[11-12],而两侧的分流隔墩则无需缩进^[13-14]。

调整段位于扩散段之后,苏曼等^[15]认为调整段可以改善侧式进/出水口拦污栅断面流速分布的均匀性;刘帅等^[16]指出当调整段长度大于扩散段长度的30%时可取得较好的水力特性,且调整段越长,拦污栅断面流速分布越均匀;Zhu等^[17]认为调整段可以有效降低拦污栅断面的流速不均匀系数;韩立^[18]认为调整段可起到改善流速分布、平顺水流的作用。

综上所述,已有研究多聚焦于侧式进/出水口调整段或扩散段的单一体型参数对水力特性的影响,而并未探讨当侧式进/出水口总长度不变时,如何合理分配调整段长度与扩散段长度这一关键问题。因此,本文在保持侧式进/出水口总长度不变的前提下,采用数值模拟方法探讨调整段长度与扩散段长度之比对侧式进/出水口水力特性的影响,以确定抽水蓄能电站侧式进/出水口最优调整段长度。

1 研究对象

以亚布力抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口为研究对象,该进/出水口体型结构如图1所示。扩散段长39.0 m,调整段长16.0 m,防涡梁段长10.1 m;内设3个分流隔墩将进/出水口分为4个孔

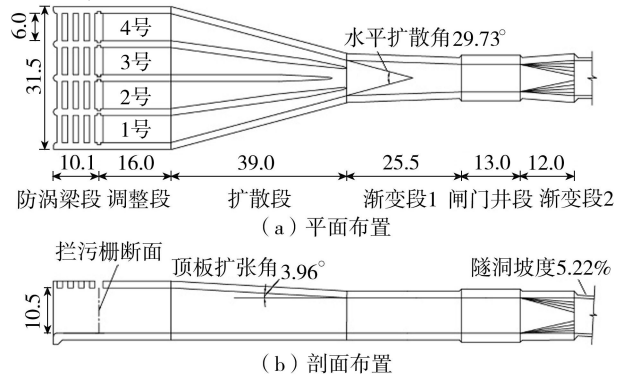


图1 进/出水口体型结构(单位:m)

道,每个孔道拦污栅断面宽6.0 m,高10.5 m;水平扩散角为29.73°,顶板扩张角为3.96°;输水隧洞洞径为7.8 m,隧洞坡度为5.22%。参照孔口中心基准,死水位条件下淹没水深为13.75 m。一般情况下,抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段与扩散段总长在50~60 m之间,该进/出水口调整段与扩散段总长为55 m,处于上述范围内。

2 模型建立与验证

2.1 控制方程及求解方法

连续性方程和雷诺方程分别为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + f_i \tag{2}$$

式中: x_i, x_j 为坐标分量; $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ 分别为*i*和*j*方向的速度时均量; t 为时间; ρ 为液体密度; $\bar{p}$ 为压强时均量; u'_i, u'_j 分别为*i*和*j*方向的速度脉动量; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺应力; f_i 为作用于单位质量水体的体积力; μ 为动力黏滞系数。

由于式(2)中存在未知的雷诺应力项,方程组不封闭,故引入湍流模型^[19]完成方程组封闭后方可求解。鉴于湍流模型中的雷诺应力模型能在保证较高计算效率的同时,准确描述三维空间中的扩散输运过程^[20-21],适用于进/出水口的数值模拟计算。因此,本文选用雷诺应力模型针对雷诺应力张量的所有分量构造附加输运方程,然后联立求解雷诺方程、附加输运方程、湍动能和耗散率方程。雷诺应力模型的附加输运方程、湍动能和耗散率方程见文献^[22]。离散方法采用有限体积法^[23]。

2.2 计算区域及网格剖分

计算区域包括部分隧洞、侧式进/出水口、明渠反坡段和对称库区水域。固壁表面采用无滑移条件,库区边界给定水位,隧洞边界按流量给定平均流速。计算区域采用六面体结构化网格。扩散段分流隔墩头部区域实施多级渐进式网格加密,该区域网格尺寸为0.01~0.10 m,其余区域网格尺寸为0.35 m,网格总数约为1 800万个,计算区域及网格剖分如图2所示。

2.3 模型验证

选取已开展物理模型试验的枣庄山亭抽水蓄能电站侧式进/出水口进行数值模拟,将两者所取得的关键水力指标进行对比,以验证本文数值模拟方法的可靠性和准确性。该进/出水口体型参数如下:侧式进/出水口总长度为76 m,其中扩散段长47 m,调

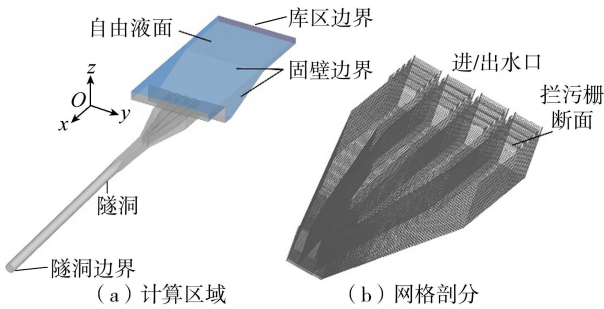


图2 计算区域及网格剖分

整段长 18 m, 防涡梁段长 11 m。水平扩散角为 29.45°, 顶板扩张角为 3.17°, 经渐变段、平直隧洞段、闸门井段后接坡度为 5.5% 的斜直隧洞。死水位条件下淹没水深为 14.32 m, 出流工况流量为 251.00 m³/s, 进流工况流量为 189.54 m³/s, 模型缩尺为 37.6。出流和进流工况下拦污栅断面流速分布试验值与数值模拟值的对比见图 3 (中、边孔拦污栅断面流速的试验值取自文献[24]), 结果表明数值模拟值与试验值的相对误差在 5% 以内, 验证了本文数值模拟方法的可靠性和准确性。

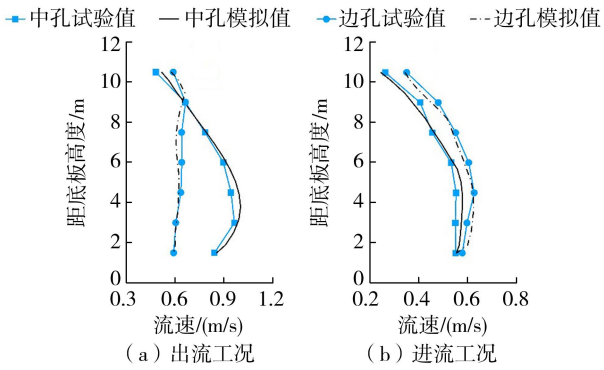


图3 拦污栅断面流速分布

2.4 计算工况

亚布力抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口数值模拟以死水位为库区边界条件, 此时孔口中心淹没水深为 13.75 m。为探究最优调整段长度, 在侧式进/出水口孔口宽度与高度以及进/出水口总长度均保持不变的情况下, 设计了 9 组体型参数 (表 1), 其中调整段长度 L_1 与扩散段长度 L_2 之比 (L_1/L_2)

表1 进/出水口体型参数

编号	L_1/L_2	L_1/m	L_2/m	水平扩散角/(°)	顶板扩张角/(°)
1	0	0	55.0	21.31	2.81
2	0.1	5.0	50.0	23.39	3.09
3	0.2	9.2	45.8	25.47	3.37
4	0.3	12.7	42.3	27.50	3.65
5	0.4	15.7	39.3	29.51	3.93
6	0.5	18.3	36.7	31.50	4.21
7	0.6	20.6	34.4	33.49	4.49
8	0.7	22.6	32.4	35.43	4.76
9	0.8	24.4	30.6	37.37	5.04

变化范围为 0~0.8, 包含了 NB/T10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》的推荐值 0.4。对各组体型参数所对应的进/出水口体型进行出流和进流工况下的数值模拟研究 (出流工况流量为 175.24 m³/s, 进流工况流量为 131.46 m³/s), 共计 18 组。

3 结果与分析

3.1 出流工况

3.1.1 拦污栅断面流速分布

为保证拦污栅结构安全, 拦污栅断面的流速宜均匀分布。由于进/出水口的体型对称, 本文以中孔 2 号、边孔 1 号为例进行研究。图 4 为出流工况下不同 L_1/L_2 时拦污栅断面中垂线流速分布 (y 为测点至进/出水口底板的高度, H 为孔口高度)。图 4 表明, 出流工况下中孔与边孔的拦污栅断面流速分布受 L_1/L_2 的影响并不相同。对于中孔而言, 随着 L_1/L_2 不断增大, 拦污栅断面最大流速位置即主流位置由孔口中上部逐渐降低至孔口底部; 当 $L_1/L_2 = 0.5$ 时, 主流位置居于孔口中部, 拦污栅断面流速分布基本上下对称; 当 $L_1/L_2 \leq 0.2$ 时, 拦污栅断面底部出现负流速; 当 $L_1/L_2 > 0.2$ 时, 拦污栅断面并未出现负流速。对于边孔而言, 断面最大流速位置变化并不明显, 拦污栅断面流速分布呈上部小底部大的变化趋势, 且随着 L_1/L_2 的增大, 该趋势越明显。另外, 边孔的拦污栅断面始终没有出现负流速。分析原因: 出流工况下水流经由隧洞段进入进/出水口内部时, 中孔流量较大, 当 $L_1/L_2 \leq 0.2$ 时, 由于调整段长度较小, 易在调整段底部形成回流区并产生负流速, 而随着调整段的延长, 水流经调整段后主流位置逐渐下移, 回流区范围逐渐减小, 故负流速消失。而边孔水流在平面上扩散更为充分, 调整段内不易产生回流区, 因此边孔拦污栅断面无负流速且主流位置变化不明显。

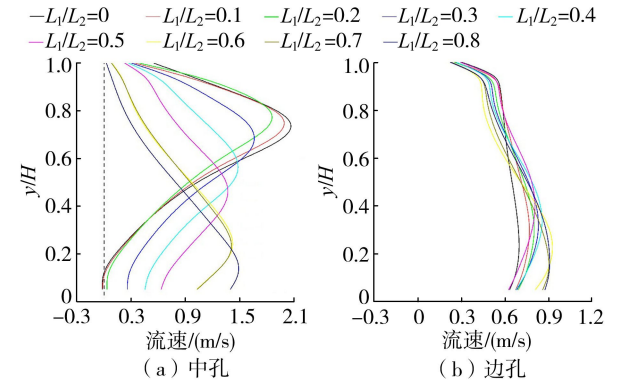


图4 出流工况拦污栅断面中垂线流速分布

NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》要求拦污栅断面的流速不均匀系数 (即断面流速最

大值与平均流速的数值比)应小于2。表2为出流工况下不同 L_1/L_2 时拦污栅断面中、边孔流速不均匀系数。由此可见,随着 L_1/L_2 的增大,中、边孔拦污栅断面流速不均匀系数均呈先减小后增大的趋势。当 $L_1/L_2 \geq 0.3$ 时,中、边孔流速不均匀系数均小于2,当 $L_1/L_2 = 0.5$ 时,中、边孔流速不均匀系数均为各体型方案中的最小值,分别为1.66和1.29。分析原因:当 L_1/L_2 小于0.5时,随着 L_1/L_2 不断增大,调整段对流速不均匀系数的改善效果显著;当 L_1/L_2 大于0.5时,因扩散段长度较短,水流难以充分扩散,即使调整段长度有所增大,也无法有效降低流速不均匀系数; $L_1/L_2 = 0.5$ 为调整段长度与扩散段长度之比的临界点,此时拦污栅断面流速分布最均匀,拦污栅断面流速不均匀系数最小。

表2 出流工况拦污栅断面流速不均匀系数

L_1/L_2	中孔流速不均匀系数	边孔流速不均匀系数
0	2.48	1.82
0.1	2.41	1.75
0.2	2.27	1.61
0.3	1.99	1.47
0.4	1.76	1.40
0.5	1.66	1.29
0.6	1.80	1.45
0.7	1.78	1.52
0.8	1.98	1.58

3.1.2 进/出水口沿程流速分布

为分析不同 L_1/L_2 时进/出水口沿程流速分布规律,在扩散段与调整段内部选取若干典型断面,获取各断面的流速分布。典型断面确定如下:沿出流方向,以防涡梁末端为起点($x=0\text{ m}$),在扩散段与调整段内各选取4个典型断面。由于不同方案对应的扩散段长度和调整段长度各不相同,为便于比较,除选取扩散段始端、扩散段末端、调整段始端及调整段末端4个断面外,还在扩散段和调整段内部各选取2个断面,这2个断面分别将扩散段和调整段三等分。图5~7为出流工况下不同 L_1/L_2 时进/出水口沿程流速分布。由图可知,进/出水口内部扩散段与调整段中孔流速大于边孔流速。水流由隧洞进入扩散段后逐渐分流,断面平均流速逐渐减小;当水流进入调整段后,断面最大流速逐渐减小,断面流速分布趋于均匀。随着 L_1/L_2 的增大,中孔主流位置由上部移至下部,而边孔主流区变化不明显。

3.1.3 各孔口流量分配与水头损失

本文以孔口流量不均匀程度(实际流量与理想流量之差与理想流量之比)作为衡量各孔口流量分配均匀性的指标。图8为出流工况下不同 L_1/L_2 时进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数。

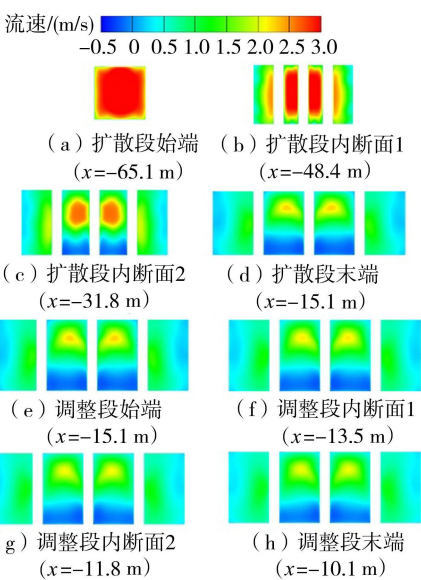


图5 出流工况进/出水口沿程流速分布($L_1/L_2 = 0.1$)

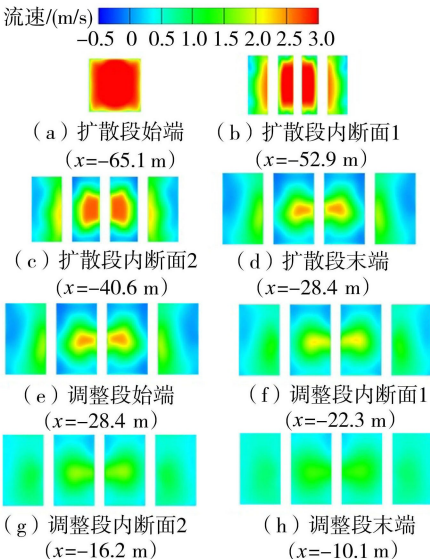


图6 出流工况进/出水口沿程流速分布($L_1/L_2 = 0.5$)

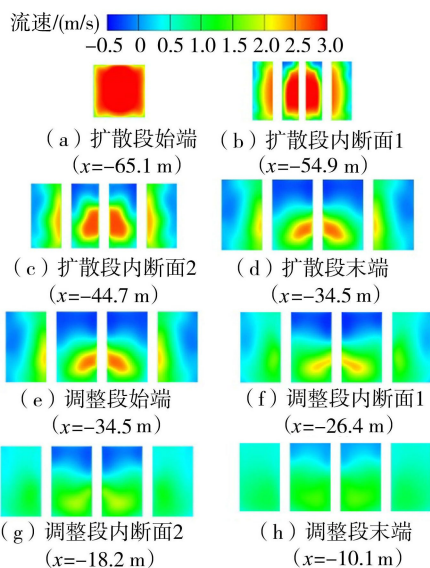


图7 出流工况进/出水口沿程流速分布($L_1/L_2 = 0.8$)

1-1(边孔)、1-2(中孔)、1-3(中孔)、1-4(边孔)分别对应图1中1号、2号、3号、4号孔口。可见中、边孔流量不均匀程度受 L_1/L_2 变化的影响较小,各孔口流量不均匀程度均在10%以内。因此,出流工况下 L_1/L_2 的变化对各孔口流量分配影响很小。

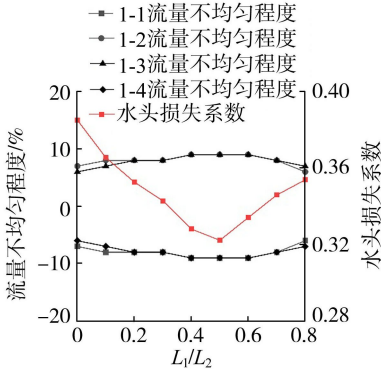


图8 出流工况进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数

水头损失是影响电站经济效益的重要指标^[25-26]。为保证所选断面流速分布较为均匀,故选取扩散段上游1.5倍洞径处断面及库水位断面作为计算进/出水口水头损失的典型断面。在保持侧式进/出水口总长度不变的条件下计算不同 L_1/L_2 时的水头损失及水头损失系数,结果见图8。可知出流工况下水头损失系数随 L_1/L_2 增大先减小后增大,当 $L_1/L_2=0.5$ 时,水头损失系数最小。

3.2 进流工况

3.2.1 拦污栅断面流速分布

图9为进流工况下不同 L_1/L_2 时拦污栅断面中垂线流速分布,可知不同 L_1/L_2 时,中、边孔拦污栅断面流速分布基本重合,拦污栅断面主流位置均靠近孔口中下部,且孔口中下部流速分布较为均匀,孔口上部流速逐渐减小,且其数值几乎不随 L_1/L_2 增大而发生变化。

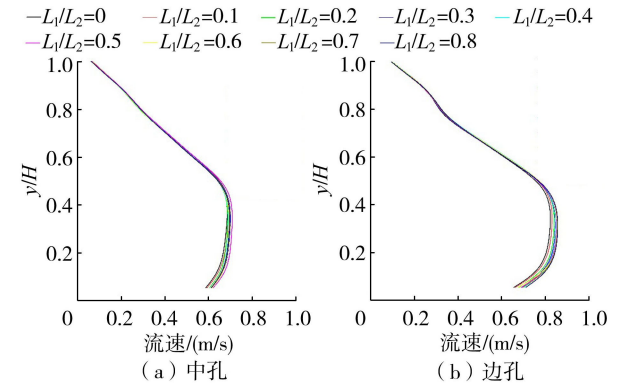


图9 进流工况拦污栅断面中垂线流速分布

表3给出了进流工况下不同 L_1/L_2 时中、边孔流速不均匀系数,可见随着 L_1/L_2 的增大,中、边孔流速不均匀系数变化并不明显。因此, L_1/L_2 的变

化并未对进流工况下拦污栅断面的流速分布产生明显影响。

表3 进流工况拦污栅断面流速不均匀系数

L_1/L_2	中孔流速不均匀系数	边孔流速不均匀系数
0	1.39	1.42
0.1	1.40	1.42
0.2	1.40	1.43
0.3	1.41	1.44
0.4	1.40	1.43
0.5	1.41	1.44
0.6	1.40	1.44
0.7	1.41	1.44
0.8	1.41	1.44

3.2.2 进/出水口沿程流速分布

分析计算结果可知,随着 L_1/L_2 的增大,中、边孔主流位置变化均不明显,沿程流速变化规律基本一致,流速分布较为均匀。水流由库区进入调整段后,断面流速无明显变化,而当水流进入扩散段后,由于水流收缩,断面流速分布趋于均匀,同时因断面面积不断减小,各孔口沿程平均流速随之增大。因此,进流工况下, L_1/L_2 对进/出水口内部流速分布基本无影响。图10为进流工况下 $L_1/L_2=0.5$ 时进/出水口沿程流速分布,可见各断面流速分布较为均匀,且流速沿调整段至扩散段递增,直观印证了上述规律。

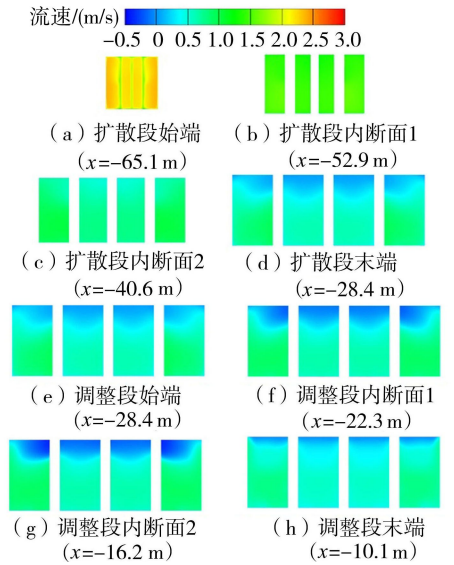


图10 进流工况进/出水口沿程流速分布($L_1/L_2=0.5$)

3.2.3 各孔口流量分配与水头损失

图11为进流工况下不同 L_1/L_2 时进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数。由图11可知,随着 L_1/L_2 增大,各孔口流量不均匀程度无明显变化(变化范围均在10%以内)。因此,进流工况下 L_1/L_2 的变化对孔口流量分配影响很小。此外,在侧式进/出水口总长度不变的条件下,随着 L_1/L_2 的增大,进流工况下水头损失系数不断减小。分析其

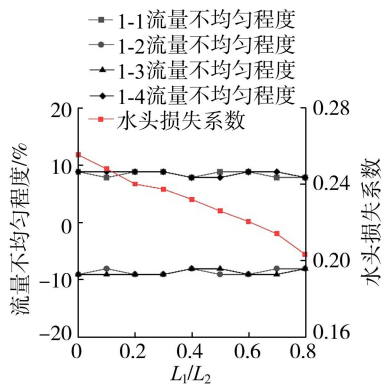


图 11 进流工况进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数

原因:调整段沿程断面面积不变,沿程断面平均流速也不变,流速梯度变化很小,故水头损失较小;而扩散段因水流收缩,沿程断面平均流速不断增大,流速梯度变化较大,水头损失也较大。因此,在侧式进/出水口总长度不变的条件下,增大 L_1/L_2 可有效降低进/出水口的总水头损失。

4 讨论

NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》建议调整段长度取扩散段长度的 40%。本文研究表明,在侧式进/出水口总长度不变的条件下,当 $L_1/L_2=0.4$ (调整段长度取扩散段长度的 40%) 时,进/出水口各项水力指标满足设计要求,该结果与规范建议值吻合。然而,进一步分析表明,将比值优化为 $L_1/L_2=0.5$ (调整段长度为扩散段长度的 50%) 时,能够更为显著地均化拦污栅断面的流速分布,拦污栅断面流速不均匀系数进一步降低。此外,刘帅等^[16]通过保持扩散段长度不变、增大调整段长度开展相关研究,其做法使调整段与扩散段的总长度增大;而在实际工程中,侧式进/出水口的总长度通常不变。本文在调整段与扩散段总长度不变的条件下进行研究,核心变量为调整段长度与扩散段长度之比而非绝对长度,更符合工程实际。

5 结论

a. 出流工况下,拦污栅断面的流速分布受 L_1/L_2 影响显著。随着 L_1/L_2 不断增大,中孔拦污栅断面主流位置逐渐由孔口中上部降低至孔口底部,且中孔的负流速逐渐消失;边孔拦污栅断面的主流位置变化不明显;中、边孔拦污栅断面流速不均匀系数均先减小后增大。进流工况下, L_1/L_2 对拦污栅断面的流速分布基本无影响。

b. 无论是出流工况还是进流工况,随着 L_1/L_2 不断增大,各孔口流量不均匀程度均无明显变化。

出流工况下,水头损失系数随 L_1/L_2 增大呈先减小后增大的趋势;进流工况下,水头损失系数随 L_1/L_2 增大而持续减小。

c. 一定长度调整段的存在能降低拦污栅断面流速不均匀系数,改善拦污栅断面的流速分布,减小进/出水口的水头损失。然而,在进/出水口总长度一定的条件下,调整段并非越长越好。当调整段长度为扩散段长度的 50% 时,侧式进/出水口的各项水力指标均相对更优。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周建平,杜效鹤,周兴波. 面向新型电力系统的水电发展战略研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(7): 106-115. (Zhou Jianping, Du Xiaohu, Zhou Xingbo. Study on hydropower development strategy for new power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7): 106-115. (in Chinese))
- [3] 高学平,朱洪涛,刘殷竹,等. 进出水口双向流动结构流速分布与脉动规律研究[J]. 水利学报, 2022, 53(6): 722-732. (Gao Xueping, Zhu Hongtao, Liu Yin Zhu, et al. Research on velocity distribution and fluctuation law of bidirectional flow structure of inlet/outlet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 722-732. (in Chinese))
- [4] 郑源,吴峰,周大庆. 现代抽水蓄能电站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.
- [5] 郝荣国,吕明治,王可. 抽水蓄能电站工程技术[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社, 2023.
- [6] 高学平. 抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2024.
- [7] 刘殷竹,魏南疆. 扩散段长度对侧式进/出水口水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 79-85. (Liu Yin Zhu, Wei Nan Jiang. Effects of diffusion section length on hydraulic characteristics of side inlet/outlet [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 79-85. (in Chinese))
- [8] 高学平,曾庆康,朱洪涛,等. 侧式进/出水口顶板扩张角对拦污栅断面流速分布影响规律研究[J]. 水利学报, 2024, 55(3): 301-312. (Gao Xueping, Zeng Qingkang, Zhu Hongtao, et al. Study on the influence of the expansion angle of the side inlet/outlet roof on the velocity distribution of the trash rack section [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3): 301-312. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 高学平,罗畅,刘殷竹,等. 平面扩散角对侧式进/出水口水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):1-7. (Gao Xueping, Luo Chang, Liu Yinzhu, et al. Influence of planar diffusion angle on hydraulic characteristics of lateral inlet/outlet[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(3):1-7. (in Chinese))
- [11] 高学平,马一鸣,刘殷竹,等. 侧式进/出水口各孔道流量分配差异及影响因素[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(6):633-641. (Gao Xueping, Ma Yiming, Liu Yinzhu, et al. Differences and influencing factors of flow distribution at each channel in side inlet/outlet[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2024,57(6):633-641. (in Chinese))
- [12] 徐准,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))
- [13] 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))
- [14] 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):74-77. (Cai Fulin, Hu Ming, Zhang Zhiming. Study on guide piers in flank inlet-outlet with double flow directions[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2000,28(2):74-77. (in Chinese))
- [15] 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 Transfers and Water Science & Technology,2011,9(5):95-98. (in Chinese))
- [16] 刘帅,李天国,黄晓龙,等. 调整段长度对抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性的影响[J]. 长江科学院院报,2025,42(11):96-102. (Liu Shuai, Li Tianguo, Huang Xiaolong, et al. Effect of adjustment section length on hydraulic characteristics of side inlet/outlet in a pumped storage power station[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(11):96-102. (in Chinese))
- [17] Zhu Hongtao, Gao Xueping, Liu Yinzhu, et al. Numerical and experimental assessment of the water discharge segment in a pumped-storage power station[J]. Energy,2023,265:126375.
- [18] 韩立. 抽水蓄能电站侧式进/出水口水力设计研究[J]. 水利水电科技进展,2002,22(6):23-26. (Han Li. Hydraulic design for side inlets and outlets of pumped storage power stations[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2002,22(6):23-26. (in Chinese))
- [19] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津:天津大学出版社,2005.
- [20] Lu Liping, Zhong Luyang, Liu Yangwei. Turbulence models assessment for separated flows in a rectangular asymmetric three-dimensional diffuser[J]. Engineering Computations,2016,33(4):978-994.
- [21] 高学平,陈昊,孙博闻,等. 侧式进/出水口数值模拟湍流模型比较研究[J]. 水利水电技术,2020,51(11):109-116. (Gao Xueping, Chen Hao, Sun Bowen, et al. Comparative study on turbulence models for numerical simulation of lateral inlet/outlet[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2020,51(11):109-116. (in Chinese))
- [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))
- [23] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社,1989.
- [24] 天津大学. 枣庄山亭抽水蓄能电站工程下水库进/出水口水工模型试验研究报告[R]. 天津:天津大学,2024.
- [25] 高学平,陶文杰,朱洪涛,等. 侧式进/出水口水头损失系数多元线性回归分析[J]. 水力发电学报,2024,43(4):50-61. (Gao Xueping, Tao Wenjie, Zhu Hongtao, et al. Multiple linear regression analysis on head loss coefficients of side inlets and outlets[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(4):50-61. (in Chinese))
- [26] 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))

(收稿日期:2025-06-09 编辑:骆超)