

平面扩散角对侧式进/出水口水力特性的影响

高学平, 罗 畅, 刘殷竹, 朱洪涛

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘要:为探究平面扩散角的最佳取值范围, 依托某抽水蓄能电站侧式进/出水口, 采用数值模拟方法, 研究了不同平面扩散角条件下的进/出水口水力特性, 分析了平面扩散角对进/出水口拦污栅断面流速分布、孔口流量分配、水头损失的影响。结果表明: 在平面扩散角自 25° 增大至 45° 的过程中, 出流工况拦污栅断面流速不均匀系数逐渐减小, 孔口流量分配不均匀程度和水头损失逐渐增大; 进流工况拦污栅断面流速分布、孔口流量分配和水头损失基本无变化。综合考虑进/出水口的各项水力指标, 在拦污栅断面平均流速满足设计要求的情况下, 得出平面扩散角的最佳取值范围为 $30^\circ \sim 40^\circ$, 与现行规范相比该范围更为精确, 且与矩形渐扩管阻力系数最小的扩散角取值范围相符。

关键词:抽水蓄能电站; 侧式进/出水口; 平面扩散角; 拦污栅断面流速; 数值模拟

中图分类号:TV135

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)03-0001-07

Influence of planar diffusion angle on hydraulic characteristics of lateral inlet/outlet//GAO Xueping, LUO Chang, LIU Yinzhu, ZHU Hongtao (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To investigate the optimal range of the planar diffusion angle, this study employed a numerical simulation method to analyze the hydraulic characteristics of a lateral inlet/outlet in a pumped storage power station under different planar diffusion angles. The influence of the planar diffusion angle on the velocity distribution at the trash rack section, orifice flow distribution, and head loss of the inlet/outlet was analyzed. The results demonstrated that when the planar diffusion angle increased from 25° to 45° , the non-uniformity coefficient of the velocity at the trash rack section decreased gradually under the outflow condition, while the non-uniformity of the orifice flow distribution and head loss of the inlet/outlet increased gradually. The velocity distribution at the trash rack section, orifice flow distribution, and head loss of the inlet/outlet remained unchanged under the inflow condition. Considering the hydraulic indices of the inlet/outlet comprehensively, it is concluded that the optimal range for the planar diffusion angle is 30° to 40° when the average velocity at the trash rack section meets the design requirement. This range provides higher precision than the current specification and aligns with the diffusion angle range associated with minimal resistance coefficients in rectangular expanding conduits.

Key words: pumped storage power station; lateral inlet/outlet; planar diffusion angle; flow velocity at trash rack section; numerical simulation

抽水蓄能电站侧式进/出水口具有双向过流特性, 通过设置平面扩散角调整进/出水口内部流速分布, 可保证过栅流速满足设计要求。NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》指出, 3 隔墙 4 孔道进/出水口的平面扩散角应在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 之间, 每个孔道的分割扩散角宜小于 10° 。为探究该范围的合理性, 本文以某抽水蓄能电站上水库侧式进/出水口为例, 采用数值模拟方法, 对比分析不同平面扩散角下侧式进/出水口水力特性, 提出 3 隔墙 4 孔道进/

出水口平面扩散角的最佳取值范围。

侧式进/出水口内水流属于三维流体, 其水力特性主要受扩散段体型参数影响^[1]。分流隔墙布置在扩散段内部, 通过调节水平方向流速分布进而影响进/出水口流量分配情况^[2]。对于 3 隔墙 4 孔道进/出水口而言, 中间隔墙适当后移可以显著提高中间两孔道的流动均匀性^[3], 减小进/出水口水头损失; 分流隔墙首部中边孔宽度比为 0.24 : 0.26 时孔口流量分配最为均匀^[4]。扩散段相对长度变化对

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:刘殷竹(1992—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事水工水力学研究。E-mail: yz_liu@tju.edu.cn

进/出水口内部流动结构的影响明显,随着扩散段长度的增加,水流出现流动分离的概率增大,各项水力指标呈现先变好后变差的趋势^[5],所以扩散段相对长度过长或过短都会对水流的水力指标产生不利影响^[6]。顶板扩张角是进/出水口内部产生流动分离现象的主要原因之一^[7]。例如:高学平等^[8]研究了顶板扩张角对拦污栅断面流速分布的影响,指出矩形渐扩管阻力系数最小的扩张角度范围有许多限制条件,因此将矩形渐扩管阻力系数最小的扩张角度直接应用在体型更为复杂的侧式进/出水口中存在局限性;王晨茜等^[9]利用可实现 $k-\varepsilon$ 紊流模型对进/出水口扩散段内流动分离现象展开了研究,结果表明,减小扩散段顶板扩张角,可以有效减弱出流工况的流动分离现象,提升流速分布均匀性;Hajaali 等^[10]分析了具有不同顶板扩张角的扩散段内的水流流动分离现象,发现顶板扩张角越小,扩散段内水流紊动能和回流区域面积越小,流场具有更好的流动稳定性。扩散段平面扩散角的增大会导致水头损失的增大^[11],水流流动的不均匀性愈加明显,流场的最大湍动能增大^[12],回流区域面积和所占比例也随之发生变化^[13]。

综上所述,关于平面扩散角对进/出水口水力特性影响的研究目前还不全面,但其对实际工程的设计具有较高的参考价值。本文主要讨论具有不同平面扩散角的抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性,旨在阐明平面扩散角对进/出水口水力特性的影响,为侧式进/出水口体型设计及优化提供依据。

1 进/出水口概况

某抽水蓄能电站上水库侧式进/出水口沿水流方向依次为:防涡梁段、扩散段,全长 52.2 m。扩散段长度 L 为 41.5 m,平面为双向对称扩张,平面扩散角 α 为 32.5° ,中孔分割扩散角为 9.05° ,边孔分割扩散角为 7.20° ,立面为单向扩张,顶板扩张角 β 为 3.2° 。每个进/出水口设 3 个分流隔墙,将进/出水口分成 4 孔。分流隔墙首部中孔和边孔宽度分别为 1.26 m 和 1.62 m,中间隔墙后退距离为 2.5 m。孔口宽度为 6.4 m,孔口高度 H 为 8.6 m,每孔净宽 6.4 m。进/出水口宽度为 33.1 m(含分流隔墙)。防涡梁段长 10.7 m,为防止产生吸气漩涡在顶部共设 4 道防涡梁。进/出水口通过方形段、闸门井段、渐变段和输水隧洞相接。隧洞直径为 6.2 m。死水位时孔口中心淹没深度为 11.7 m,出流工况流量为 $119.1 \text{ m}^3/\text{s}$,进流工况流量为 $133.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。该侧式进/出水口体型如图 1 所示。

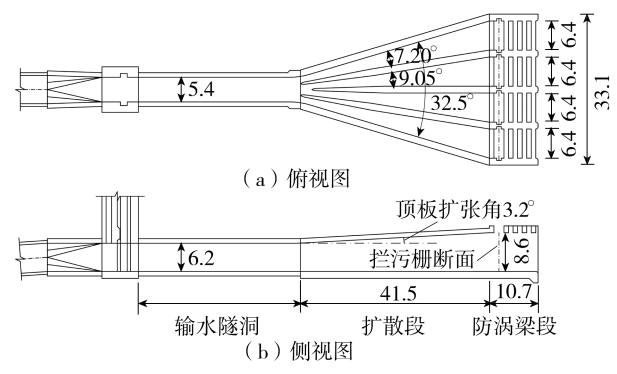


图 1 侧式进/出水口体型(尺寸单位:m)

2 研究方法

2.1 控制方程及求解方法

本文采用的控制方程为时均化的连续性方程和雷诺方程。由于方程组中存在雷诺应力项,需要封闭进而求解,因此选取雷诺应力模型(Reynolds stress model, RSM)对雷诺方程进行封闭。RSM 考虑了各向异性效应,针对雷诺应力构造输运方程,较为严格地考虑了流线曲率及表面张力的快速变化,能较好地模拟进/出水口内部的三维扩散流动^[14]。连续性方程、Navier-Stokes 方程、RSM 的输运方程、湍动能和耗散率方程详见文献[15]。控制方程采用有限体积法求解,空间离散采用二阶迎风格式,压力与速度耦合求解采用 SIMPLE 算法。

2.2 模型建立

构建上述侧式进/出水口的数值模型。为研究扩散段平面扩散角对水力特性的影响,避免其他边界的影响,在上述进/出水口基础上,库区范围取明渠两侧对称。计算区域包括库区、明渠、进/出水口和隧洞,库区横向宽度取 $4B$ (B 为进/出水口宽度),纵向长度取 $3C$ (C 为明渠长度),隧洞长度取距离渐变段 $20D$ (D 为隧洞直径)。出流时,水流由输水隧洞经进/出水口流出至库区。进流时,水流由水库流入进/出水口至输水隧洞。库区边界依据水库水位按静水压强给出,隧洞断面边界依据流量按平均流速给出。固壁边界采用无滑移条件。整个模型采用结构化六面体网格,网格总数约 1200 万,计算区域及网格如图 2 所示。

2.3 模型验证

建立上述侧式进/出水口的物理模型,对其拦污栅断面流速进行试验量测,模型试验结果取自文献[16],模型缩尺 34.44。沿各孔拦污栅断面中垂线取 9 个测点,将各测点的模型试验结果与计算结果进行比较,见图 3 和图 4。各测点流速试验值与计算值的相对误差在 0.16%~5.18%之间,模型计算结果与模型试验结果吻合较好,验证了本文数值模型计算结果的准确性。

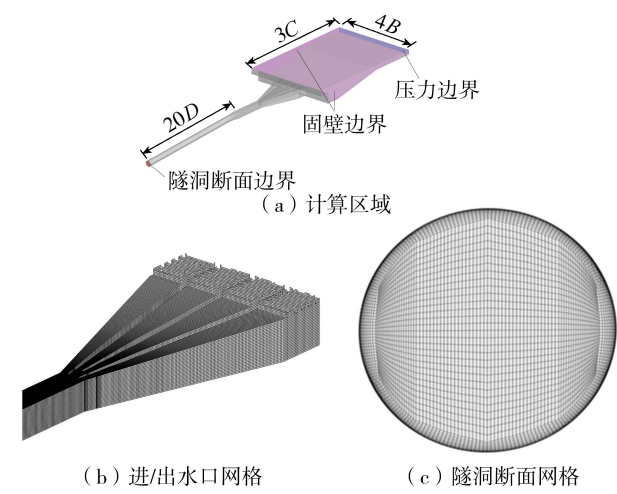


图2 计算区域及模型网格

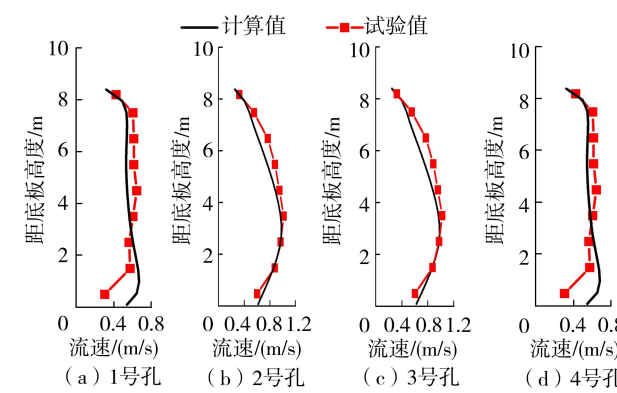


图3 出流工况拦污栅断面流速分布

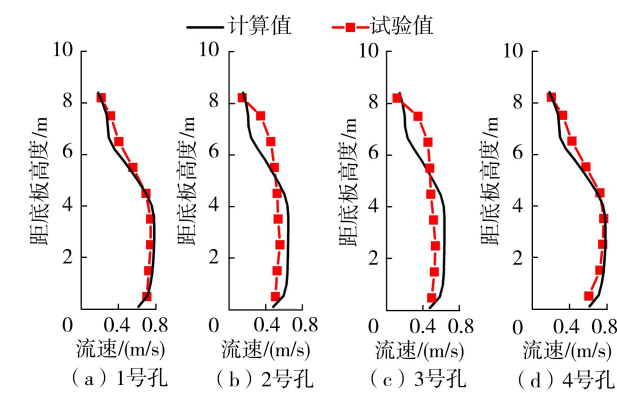


图4 进流工况拦污栅断面流速分布

3 结果与分析

3.1 计算工况

为研究平面扩散角对进/出水口水力特性的影响,在进/出水口孔口面积、扩散段长度、扩散段内墩头布置方式等均不变的条件下,在 NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》推荐的平面扩散角范围 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 内设置了 9 组平面扩散角,相邻平面扩散角相差 2.5° 。在出流工况和进流工况下对进/出水口进行数值模拟。具体体型参数列于表 1。死水位时进/出水口水流条件最差,且随着水位的升

高,进/出水口的关键水力指标基本不变^[17]。因此,本文的研究均在死水位下进行。计算条件为:死水位时孔口中心淹没深度 12.9 m,出流工况流量 $119.1\text{ m}^3/\text{s}$,进流工况流量 $133.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。

表1 不同平面扩散角进/出水口的体型参数

序号	扩散段长度/m	孔口高度/m	孔口宽度/m	顶板扩张角/($^{\circ}$)	平面扩散角/($^{\circ}$)
1	41.5	11.1	4.9	6.7	25.0
2	41.5	10.1	5.4	5.4	27.5
3	41.5	9.3	5.9	4.2	30.0
4	41.5	8.5	6.4	3.2	32.5
5	41.5	7.9	6.9	2.4	35.0
6	41.5	7.4	7.4	1.6	37.5
7	41.5	6.9	7.9	1.0	40.0
8	41.5	6.5	8.4	0.4	42.5
9	41.5	6.1	8.9	0	45.0

应当指出,保持进/出水口孔口面积不变是为保证过栅平均流速不变,扩散段长度不变是因为进/出水口长度是考虑库区地形条件及隧洞布置等确定的,一般不轻易改变,进/出水口扩散段内墩头布置方式不变是为保证流量分配情况仅受平面扩散角影响,从而使研究结果更具实际意义。通过增大孔口宽度,达到增大平面扩散角的目的。

3.2 平面扩散角对拦污栅断面流速分布的影响

NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》规定,拦污栅断面平均流速不宜大于 1 m/s ,拦污栅断面流速不均匀系数应小于 2.0。为全面反映拦污栅断面的流速分布,每个进/出水口的每个孔口的拦污栅断面均布置左、中、右 3 条垂向测线。各孔口的测线标号详见图 5,沿出流方向,1—1 断面为孔道起始断面,3—3 断面为扩散段中间断面,5—5 断面为扩散段末端断面。为使研究成果具有普适性,距底板距离按无量纲相对高度给出,即距底板距离 y 与孔口高度 H 的比值;流速 v 以孔口平均流速 $\bar{v}$ 进行无量纲化处理,得到无量纲流速。

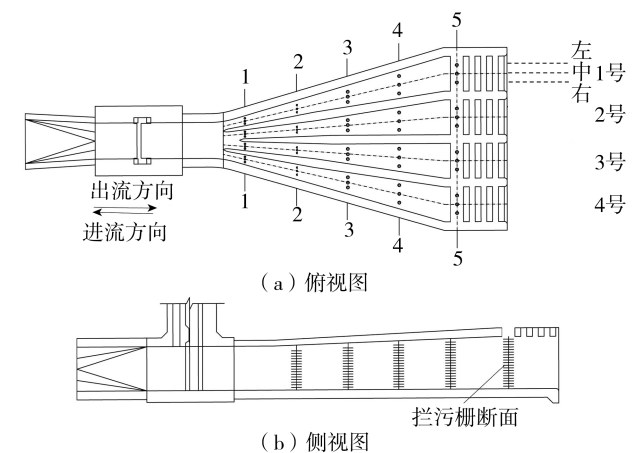


图5 测线布置

3.2.1 出流工况

由于进/出水口体型在水平方向上对称,以中孔2号和边孔1号为例进行分析。图6为不同平面扩散角下出流工况拦污栅断面垂向流速分布。

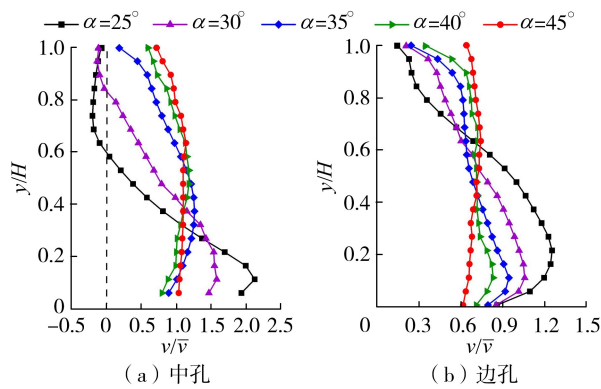


图6 出流工况拦污栅断面垂向流速分布

对于中孔而言,平面扩散角为 25° 时,拦污栅断面顶部存在反向流速,约占孔口高度的 40%,随着平面扩散角的增大,反向流速减小,反向流速区范围减小,当平面扩散角为 35° 时反向流速消失。随着平面扩散角的增大,主流逐渐由孔口底部向上移动,断面流速分布由底部流速大、顶部流速小的不均匀分布逐渐变为上下对称、主流不显著的均匀分布。

对于边孔而言,拦污栅断面无反向流速,平面扩散角为 25° 时,主流明显,沿着孔口高度方向向上流速逐渐减小;随着平面扩散角的增大,断面最大流速逐渐减小,主流逐渐减弱,断面底部流速减小,顶部流速增大,断面流速分布均匀性增大。

拦污栅断面流速分布的均匀性可以用无量纲量流速不均匀系数表征,即最大流速 $v_{\max}$ 与平均流速 $\bar{v}$ 的比值,NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》指出出流工况拦污栅断面的流速不均匀系数应小于 2.0。

图7为不同平面扩散角下出流工况拦污栅断面的流速不均匀系数。随着平面扩散角的增大,中孔拦污栅断面的流速不均匀系数显著减小,平面扩散角由 25° 增至 45° 过程中,中孔流速不均匀系数由 2.35 减至 1.13,降幅为 51.9%,拦污栅断面流速分布的均匀性增强。边孔拦污栅断面流速不均匀系数同

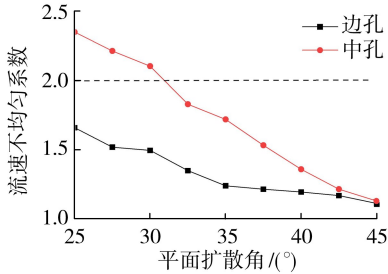


图7 出流工况拦污栅断面流速不均匀系数

样随着平面扩散角的增大而逐渐减小,但降幅明显小于中孔,当平面扩散角由 25° 增大至 45° 时,边孔流速不均匀系数由 1.66 减至 1.11,降幅为 33.1%。

综上,出流工况下平面扩散角对中孔和边孔的拦污栅断面流速不均系数的影响规律基本一致;平面扩散角越大,拦污栅断面流速不均匀系数越小,流速分布越均匀。

3.2.2 进流工况

图8为不同平面扩散角下进流工况拦污栅断面垂向流速分布。中孔和边孔流速分布规律基本一致,断面顶部和底部流速小,主流不明显,流速分布均匀。随着平面扩散角的增大,流速分布规律和流速不均匀系数基本不变,见图8和图9。分析原因是进流工况下水流经库区流入进/出水口,水流率先流经拦污栅断面后流入扩散段,扩散段内平面扩散角的变化并不能影响上游拦污栅断面流速的分布。

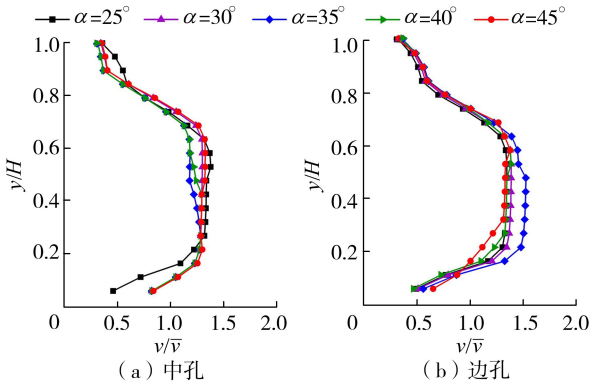


图8 进流工况拦污栅断面垂向流速分布

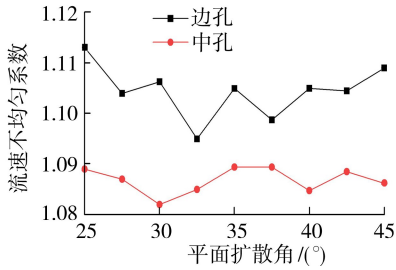


图9 进流工况拦污栅断面流速不均匀系数

综上,进流工况下平面扩散角的大小对拦污栅流速分布规律基本无影响。

3.3 平面扩散角对孔口流量分配的影响

孔口流量分配情况可以用孔口流量比(孔口实际流量与孔口理论流量之比)表征。实际工程中孔口流量比在 0.9~1.1 范围内即满足要求^[10],当孔口流量比超出该范围时,不但增加了进/出水口水头损失,还会导致拦污栅断面局部流速偏大,对拦污栅结构安全造成威胁。图10为各孔流量比随平面扩散角的变化。出流工况下,中孔孔口流量比随着平面扩散角的增大缓慢增大,边孔则反之;当平面扩散

角大于 40° 时各孔孔口流量比超出 $0.9 \sim 1.1$ 的范围,流量分配不均匀。进流工况下,随着平面扩散角增大,各孔口流量比基本不变,均在 $0.9 \sim 1.1$ 之间,流量分配均匀。

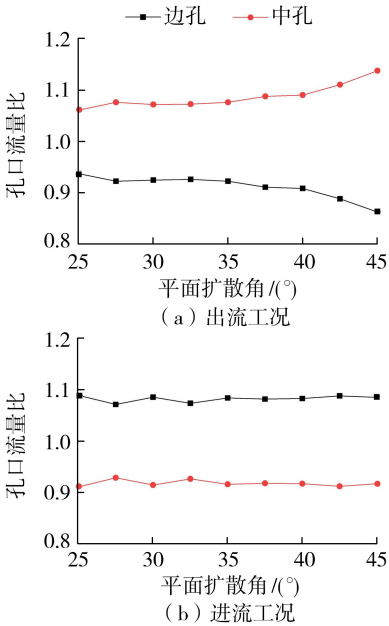


图 10 孔口流量比

综上,平面扩散角孔口流量分配的影响主要体现在出流工况,平面扩散角越大,出流工况孔口流量分配越不均匀,进流工况几乎无变化。

3.4 平面扩散角对水头损失系数的影响

水头损失系数是衡量抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性的关键指标,图 11 为进/出水口水头损失系数随平面扩散角的变化。当平面扩散角从 25° 增大至 45° 时,出流工况水头损失系数从 0.31 增大至 0.36 ,增大了 16.1% ,进流工况水头损失系数基本不变。分析原因是随着平面扩散角增大,出流工况下扩散段内流动分离越剧烈,主流区占比逐渐减小,低流速区与主流区流体相互挤压碰撞,进行能量交换与耗散,增大水流的紊动强度,进而导致进/出水口的水头损失增加;进流工况下水流平稳收缩,无流动分离现象产生,水流紊动强度低,平面扩散角的增大对扩散段内水流流动规律影响较小,因而水头损失较小且不随平面扩散角的变化而变化。

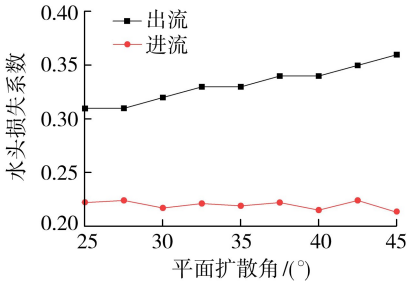


图 11 进/出水口水头损失系数

综上,随着平面扩散角的增大,出流工况水头损失系数逐渐增大,进流工况水头损失基本不变。

3.5 进/出水口内部沿程流态

3.5.1 出流工况

图 12 为出流工况下进/出水口的沿程流速云图,图 13 为出流工况下进/出水口孔口中心截面沿程流速矢量图。不同平面扩散角进/出水口扩散段内水流均受到与水流方向相反的逆压力梯度影响,均产生流动分离现象,形成低流速区,随着水平扩散角的增大,低流速区的区域不断变化。

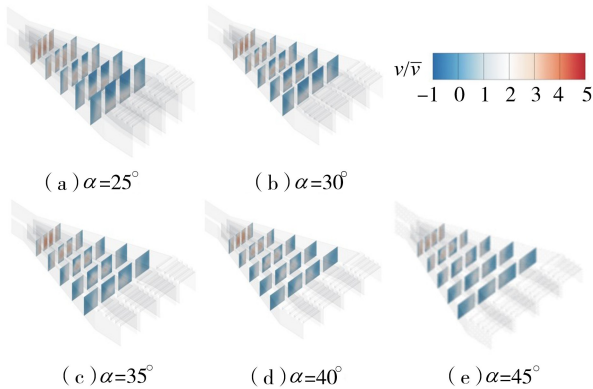


图 12 出流工况进/出水口沿程流速

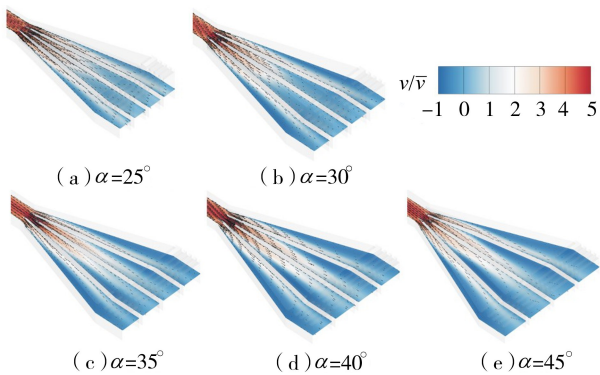


图 13 出流工况进/出水口孔口中心截面 ($y/H=0.5$) 沿程流速

对于中孔而言,当平面扩散角为 25° 和 30° 时,水流在水平方向上均匀分布,垂向上断面底部流速大,顶部存在一定范围的低流速区。当平面扩散角增至 35° 时,扩散段中部孔道边壁附近开始出现流动分离现象,形成低流速区,水流受到低流速区的挤压作用向孔道另一侧边壁和孔道顶部靠近,水平方向紊动能增大,垂向紊动能减小。当平面扩散角为 40° 和 45° 时,水平方向流动分离点逐渐向孔道中心移动,低流速区向孔道中心延伸,主流区域变窄长,垂向流速分布均匀。

对于边孔而言,随着平面扩散角的增大,扩散段内部水流的流动分离程度增大,低流速区面积逐渐增大。当平面扩散角大于等于 35° 时,低流速区面积大于主流区,扩散段末端水流贴壁流入防涡梁段。

3.5.2 进流工况

图 14 为进流工况下进/出水口的沿程流速云图,图 15 为进流工况下进/出水口孔口中心截面沿程流速矢量图。不同平面扩散角进/出水口内部流动规律基本一致,水流由库区汇入进/出水口,均匀收缩,在孔道顶部形成小范围的低流速区,无明显的流动分离现象。随着平面扩散角的增大,扩散段沿程断面平均流速减小。

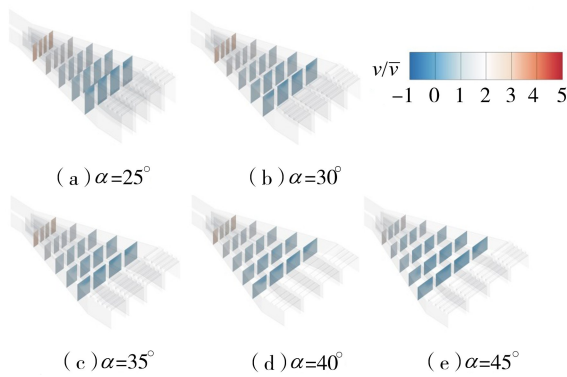


图 14 进流工况进/出水口沿程流速

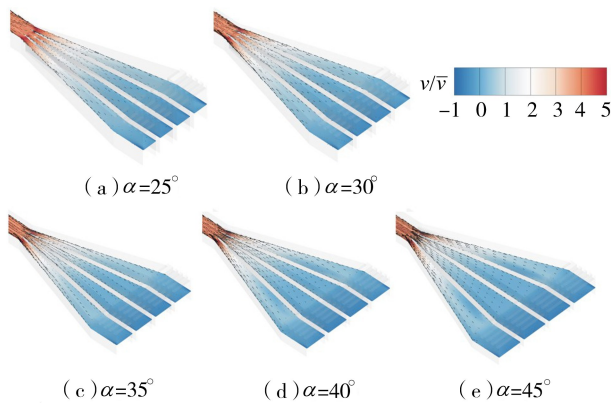


图 15 进流工况进/出水口孔口中心截面 ($y/H=0.5$) 沿程流速

综上,随着平面扩散角的增大,出流工况下,进/出水口内低流速区面积增大的同时位置也发生了变化^[18],由进/出水口顶部逐渐移动至进/出水口孔道边壁侧,进而导致水头损失增大、拦污栅断面流速垂向分布均匀。进流工况下,进/出水口内部流态基本不随平面扩散角的变化而变化,因而进流工况下进/出水口水力特性几乎不受平面扩散角的影响。

4 讨论

4.1 顶板扩张角对进/出水口水力特性的影响

为使研究成果更具实际意义,本文在研究平面扩散角对进/出水口水力特性的影响时,保持拦污栅断面过栅平均流速不变。此时,若平面扩散角增大,则顶板扩张角减小。进/出水口的各项关键水力指标随顶板扩张角减小的变化趋势,与随平面扩散角

增大的变化趋势是相同的。结合图 12 和图 13 可知,出流工况下随着顶板扩张角的减小、平面扩散角的增大,扩散段在垂向上的扩散作用减弱,进/出水口内低流速区与主流区的相对位置由上下分布逐渐变为左右分布。此时,平面扩散角对进/出水口内部流态起主导作用。

4.2 平面扩散角取值范围

综合前文的研究分析,平面扩散角大于 30° 时拦污栅断面流速分布均匀;平面扩散角小于 40° 时孔口流量分配均匀。因此,对于 3 隔墙 4 孔道进/出水口,平面扩散角宜在 $30^\circ\sim40^\circ$ 之间。

侧式进/出水口扩散段在水平方向为双向对称扩散,与矩形渐扩管类似。《实用流体阻力手册》^[19]指出,对于矩形渐扩管,当雷诺数 $Re>4\times10^5$ 、水头损失系数 $\xi=0.18\sim0.28$ 、 $A_1/A_0=4$ 、 $L/b_0=5.7\sim9.4$ 、单向(水平方向或垂向)对称扩散角度 $\theta=6^\circ\sim10^\circ$ 时,矩形渐扩管阻力系数最小,其中 A_0 和 A_1 为扩散前和扩散后的断面总面积, L 为扩散段长度, b_0 为扩散前的断面宽度。按照《实用流体阻力手册》^[19],3 隔墙 4 孔道进/出水口的平面扩散角应在 $24^\circ\sim40^\circ$ 之间。本文所得的进/出水口平面扩散角的最佳取值范围为 $30^\circ\sim40^\circ$,符合矩形渐扩管阻力系数最小的扩散角取值范围,验证了本文研究结果的可靠性。

分析进/出水口平面扩散角取值范围较矩形渐扩管阻力系数最小的扩散角取值范围小的原因,是进/出水口扩散段内部流动与矩形渐扩管并非完全一致,侧式进/出水口的扩散段不仅在水平方向扩散,在垂向也存在扩散。当孔口面积相同时,平面扩散角越大,顶板扩张角越小,内部流动越接近于矩形渐扩管。

5 结论

a. 平面扩散角对出流工况拦污栅断面流速分布影响显著。出流工况下,随着平面扩散角的增大,各孔的主流逐渐不明显,拦污栅断面流速不均匀系数减小,当平面扩散角大于 30° 时,流速不均匀系数小于 2.0。不同平面扩散角下,进流工况拦污栅断面流速分布基本一致。

b. 平面扩散角增大导致出流工况的孔口流量分配不均匀程度和水头损失增大,对进流工况几乎无影响。当平面扩散角超过 40° 时,出流工况的孔口流量比超出 0.9~1.1 的范围,不满足设计要求。

c. 3 隔墙 4 孔道进/出水口平面扩散角的最佳取值范围为 $30^\circ\sim40^\circ$,符合《实用流体阻力手册》^[19]中矩形渐扩管阻力系数最小的扩散角取值范围,与现行规范相比,该取值范围更精确,可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 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))

[2] 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))

[3] 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))

[4] 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))

[5] 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 Yinzhu, WEI Nanjiang. 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))

[6] 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))

[7] 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.

[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] HAJAALI A, STOESSER T. Flow separation dynamics in three-dimensional asymmetric diffusers [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2022, 108(4) : 973-999.

[11] 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))

[12] LI Zhixiong, MORADI I, NGUYEN Q, et al. Three-dimensional simulation of wind tunnel diffuser to study the effects of different divergence angles on speed uniform distribution, pressure in outlet, and eddy flows formation in the corners [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(5) : 052006.

[13] 申屠云奇, 宋煜晨, 尹俊连, 等. 扩散角对文丘里管内湍流影响的试验研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(2) : 16-22. (SHENTU Yunqi, SONG Yuchen, YIN Junlian, et al. Experimental study on effect of diffusion angle on turbulence in venturi tube [J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(2) : 16-22. (in Chinese))

[14] LU Lipeng, 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.

[15] 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))

[16] 天津大学. 某抽水蓄能电站工程上库进/出水口水工模型试验研究报告[R]. 天津: 天津大学, 2023.

[17] 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 Yinzhu, 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))

[18] YE Fei, GAO Xueping. Numerical simulations of the hydraulic characteristics of side inlet/outlets [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(1) : 48-54.

[19] 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

(收稿日期: 2024 - 05 - 23 编辑: 俞云利)