

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.012

扩散段体型对竖井式进/出水口出流水力特性的影响

蔡付林,郭黎明,周 骏,周建旭

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为探究扩散段体型以及扩散段与竖井式进/出水口孔口底板连接方式对出流的影响,建立了国内某抽水蓄能电站上库竖井式进/出水口流场的三维数值模型,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型,计算分析了扩散段体型以及扩散段与孔口底板的连接方式对出流均匀性及水头损失的影响。结果表明:合适扩散角的锥管扩散体型较椭圆曲线扩散体型有利于竖井式进/出水口孔口流量均匀分配和降低水头损失;在锥管与孔口底板连接处增加圆弧连接虽然能够降低水头损失,但是会增加孔口流量分配的不均匀性。

关键词:抽水蓄能电站;竖井式进/出水口;扩散段;连接方式;出流均匀性;三维模型

中图分类号:TV131 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2025)05-0100-07

Effect of diffuser geometry on hydraulic characteristics of flow at shaft-type inlet/outlet

CAI Fulin, GUO Liming, ZHOU Jun, ZHOU Jianxu

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

Abstract: To investigate the effects of the diffuser geometry and its connection method with the bottom of the shaft-type inlet/outlet on the outflow characteristics, a three-dimensional numerical model of the flow field was established for the upper reservoir shaft-type inlet/outlet of a pumped storage power station in China. The Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model was employed to calculate and analyze the influence of the diffuser geometry and its connection with the bottom of the shaft-type inlet/outlet on outflow uniformity and head loss. The results indicate that a conical diffuser with an appropriate diffusion angle is more conducive to achieving uniform flow distribution among the orifices of the shaft-type inlet/outlet and reducing head loss compared to an elliptical diffuser. Although adding an arc connection at the junction between the conical diffuser and the bottom of the orifices can reduce head loss, it increases the non-uniformity of flow distribution among the orifices.

Key words: pumped storage power station; shaft-type inlet/outlet; diffuser; connection method; three-dimensional model; uniformity of outflow

抽水蓄能电站因具有灵活调控的优点,能够弥补风力发电、太阳能发电等新能源出力的反调峰缺点,受到人们的重视^[1-5],已成为新型电力系统的重要组成部分^[6-9]。抽水蓄能电站的进/出水口有侧式进/出水口和竖井式进/出水口之分,两种进/出水口都具备双向过流的能力。对于竖井式进/出水口,其体型设计应满足以下条件:进流时不产生吸气漩涡;出流时需各孔口流速、流量分布均匀,水力损失小且孔口反向流速区小^[10-13]。

目前针对抽水蓄能电站竖井式进/出水口的研究,多集中在探究竖井式进/出水口进流、出流时的水力特性以及竖井式进/出水口体型优化方面,研究方法以物理模型试验为主,也有部分学者结合了数值模拟方法进行研究。例如:Martinierie 等^[14]对瑞士的 Nant-de-Drance 和 Linth-Limmern 两座抽水蓄能电站进行了物理模型试验研究,采用超声波流速仪(UVP)对漩涡周边的流速场进行观测,针对漩涡问题提出了在进水口顶部设置平板和在进水口上方设置防涡梁的工程措施;Amiri 等^[15]对进水口顶部水平穿孔板和实心板的防涡效果进行了试验研究,发现均匀开孔板与实心板均对进/出水口的表面漩涡具有很好的消除效果;Tahershamsi 等^[16]将淹没射流作为一种新型防涡方法,通过物理模型试验发现在进水口上方采用倾斜于水面的射流,能够有效防止进气漩涡的产生;高学平等^[17]针对西龙池抽水蓄能电站原设计方案孔口出流不均匀

作者简介:蔡付林(1963—),男,教授,博士,主要从事水电站和泵站水力学与结构研究。E-mail:flcai@hhu.edu.cn

引用本文:蔡付林,郭黎明,周骏,等.扩散段体型对竖井式进/出水口出流水力特性的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):100-106.

CAI Fulin, GUO Liming, ZHOU Jun, et al. Effect of diffuser geometry on hydraulic characteristics of flow at shaft-type inlet/outlet[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5):100-106.

的问题,建立了物理模型对进/出水口的弯管段体型进行了优化,认为弯管段体型影响出流的均匀性,消除反向流速区存在困难;章军军等^[18]从堰型和防涡梁方面,设计了平堰和阶梯型防涡梁的优化体型,经过物理模型试验和数值模拟,提出优化体型在消涡、减小水头损失、减小反向流速区范围以及均匀出流上效果明显;张翰^[19]在竖井式进/出水口三维数值模型的基础上,利用单因素比较法研究了孔口高度、盖板半径、扩散段体型等参数对竖井式进/出水口出流的影响规律,指出降低孔口高度、扩大盖板半径和增大扩散段扩散程度均有助于降低反向流速区范围;刘际军等^[20]从产生反向流速区的原理出发,提出以锥管扩散代替常规椭圆曲线扩散的扩散段形式,并指出了分流墩个数对进/出水口出流的影响,但是数值模拟范围不包含弯管段,忽略了弯管段与扩散段的相互作用;高学平等^[21]建立具有弯管段的数值模型,采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型,研究了渐缩形式的弯管与等直径形式弯管以及不同长度的直管段对出流的影响,认为渐缩形式的弯管对水流的调整作用优于等直径形式弯管,通过延长直管段的长度可以达到与渐缩形式弯管相近的作用;程伟平等^[22]对竖井式进/出水口扩散段体型进行了数值模拟和物理模型试验研究,指出采用锥管扩散体型的出流均匀性优于椭圆扩散体型,给出了建议锥管扩散角的上限,但研究中并未对扩散角的下限以及锥管与孔口底板连接方式的影响进行探讨。

已有对竖井式进/出水口体型优化的研究主要针对弯管段以及扩散段,研究内容主要集中在降低反向流速区的范围,对竖井式进/出水口出流时流量在各个孔口的分配均匀性研究相对缺乏;对于扩散段体型的数值模拟研究,多采用不模拟弯管段的方法,缺少对弯管段与扩散段相互作用的研究;锥管扩散体型研究方面,缺少对锥管与进出/水口孔口底板之间连接方式的探究。本文结合国内某抽水蓄能电站上库竖井式进/出水口的体型优化开展研究,建立数值模拟范围至弯管段后引水隧洞的三维数值模型,探究扩散段体型以及扩散段与竖井式进/出水口孔口底板连接方式对出流的影响。

1 基本控制方程

Standard $k-\varepsilon$ 紊流模型假定的湍动黏度是各向同性的标量,无法反映竖井式进/出水口竖直扩散段处弯曲壁面的流动^[23]。Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型在 Standard $k-\varepsilon$ 紊流模型的基础上,在湍动黏度中引入了旋转和曲率,能够模拟包含射流和混合流的自由流动及带有分离的流动等,符合竖井式进/出水口内的水流流动特点。Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型的连续方程、动量方程、 k 方程、 ε 方程分别为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4)$$

其中

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: x_i 、 u_i 分别为坐标、速度在 i 方向的分量; t 为时间; p 为压强; ρ 为流体密度; μ 为流体动力黏度; ν 为运动黏度; τ_{ij} 为雷诺应力; μ_t 为湍动黏度; σ_k 为湍动能 k 对应的 Prandtl 数,常取 1.0; G_k 为由平均流速梯度引起的湍动能 k 的生成项; σ_ε 为耗散率 ε 对应的 Prandtl 数,常取 1.2; S 为平均应变率张量的模量; C_1 、 C_2 为系数, C_2 取 1.9。

方程求解采用有限体积法,二阶迎风格式,压力-速度耦合采用 Coupled 算法。自由液面处理采用“刚盖假定”,收敛标准为 10^{-5} ,计算足够长的时间。

2 模型建立

2.1 计算模型

某抽水蓄能电站采用 2 洞 4 机布置方式,电站上库建有两座竖井式进/出水口,每个进/出水口设有 8 个

孔口,每个孔口高度 5.0 m,竖井式进/出水口的孔口底板高程为 1 753.0 m。扩散段形式采用 1/4 椭圆曲线扩散,椭圆方程为 $x^2/4^2+y^2/20^2=1$ 。后接内径为 6.8 m,长度为 13.0 m 的直管段。直管段后是肘型弯管段。引水隧洞上设有上库进/出水口检修闸门井,引水隧洞管径 $D=6.5$ m。死水位 1 765.0 m,抽水工况单机流量 $65.6\text{ m}^3/\text{s}$ 。竖井式进/出水口主要体型参数及孔口编号如图 1 所示。

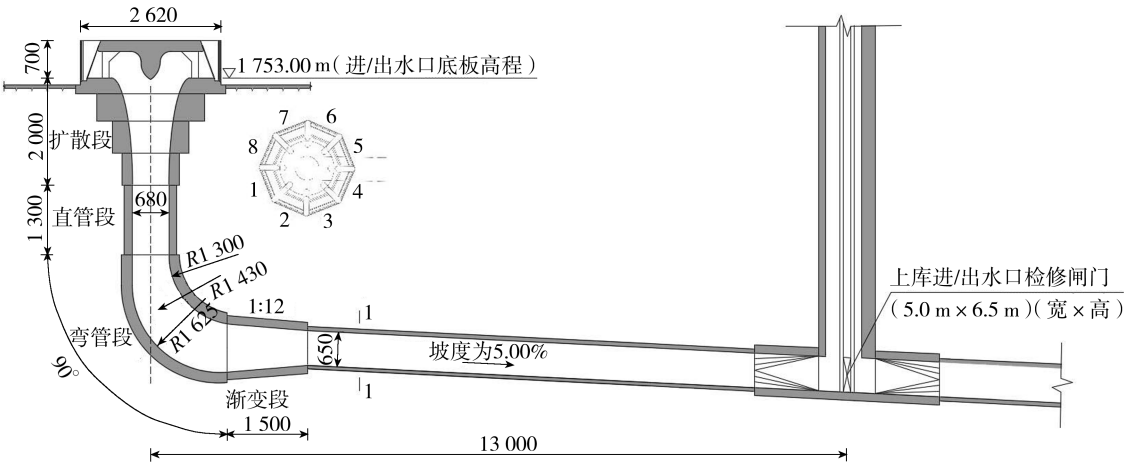


图 1 进/出水口 1/4 椭圆扩散体型 (单位:cm)
Fig. 1 1/4 elliptical diffuser of inlet/outlet (unit: cm)

数值模拟计算区域包括部分上水库、盖板、分流墩、扩散段、直管段、弯管段、渐变段、检修闸门井以及闸门井下游侧渐变段后 10D 长度引水隧洞。抽水工况时,引水隧洞给定速度入口边界条件,出口设在以盖板中心向外取 5D 半径的圆周,圆周断面给定静水压力分布。

2.2 网格划分

采用 Fluent 软件对模型进行网格划分。网格采用多面体网格 (Polyhedral),对扩散段、弯管段以及闸门井附近网格进行加密处理。网格总量约 92 万,网格划分如图 2 所示。

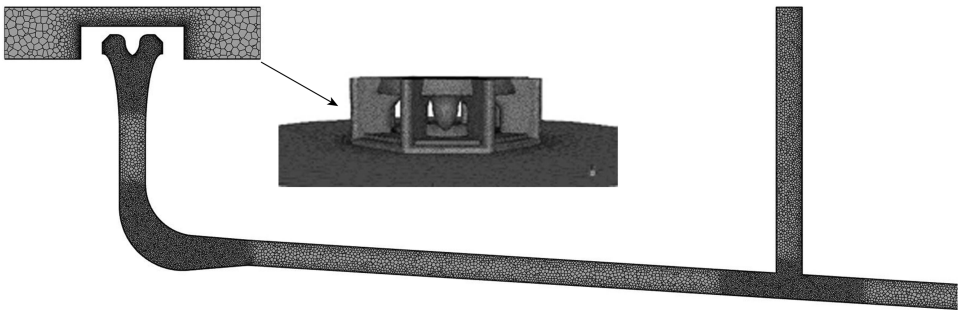


图 2 计算区域网格划分
Fig. 2 Meshing of computational domain

2.3 数值模拟方法可行性验证

为验证本文数值模拟方法的可行性,基于上述方法对溧阳抽水蓄能电站上库竖井式进/出水口进行了数值模拟计算,并用河海大学水利水电工程学院 2005 年的《溧阳抽水蓄能电站上库进/出水口模型试验研究报告》的物理模型试验数据进行验证。该电站上库采用 2 洞 6 机布置方式,竖井式进/出水口的扩散段采用 1/4 椭圆曲线扩散形式,其椭圆方程为 $x^2/7.089^2+y^2/39.706^2=1$,引水隧洞直径为 9.2 m,竖井式进/出水口的孔口高度为 7.0 m。溧阳抽水蓄能电站上库物理模型试验(模型比尺 1:50)严格模拟了包含扩散段的竖井式进/出水口结构,试验测量了多种工况下孔口的流量分配、流速分布、库区流场以及包含扩散段部分的水头损失,其结果被广泛认为能可靠反映原型流态。分别对抽水工况下 2 洞 2 机、2 洞 4 机、2 洞 6 机工况进行分析,水头损失系数的计算值与试验值基本吻合,误差最大值 5.44%,误差最小值仅为 1.83%(图 3),表明本文采用的数值模拟方法可行。

3 优化体型数值模拟结果分析

《溧阳抽水蓄能电站上库进/出水口模型试验研究报告》的物理模型试验结果与已进行的数值模拟计算结果均表明,竖井式进/出水口在发电工况进流时,水头损失系数和各个孔口流量分布的均匀性受扩散段体型以及扩散段与孔口底板连接方式的影响较小,且不同的水库水位对竖井式进/出水口的进流和出流时水头损失系数及各个孔口流量分布的均匀性影响极小。因此,本文中采用的计算条件为死水位 1 765. 0 m 下两机抽水工况 ($Q=65. 6\times 2\text{ m}^3/\text{s}$)。

3.1 扩散段体型的影响

竖井式进/出水口由于其独特的构造,使得抽水工况出流时水流都需经过两次 90°的转向,如图 1 所示。在抽水工况,引水隧洞中的水流经过弯管段的调整进入直管段,由于水流惯性的原因,主流偏向一侧,容易造成出流时孔口流量分配不均匀现象;正对来流方向的孔口中流量占比比较大,背对来流的孔口中流量占比明显较小。为研究在弯管段作用下,扩散段体型对出流的影响,对比分析了 1/4 椭圆曲线扩散形式与锥管扩散形式下的孔口出流。1/4 椭圆曲线扩散形式的椭圆方程为 $x^2/4^2+y^2/20^2=1$,体型如图 1 所示;锥管扩散型分别采用 3°、4°、5°、6°扩散角 (θ),保持直管段长度与管径不变,体型如图 4 所示。

由图 5 可知,1/4 椭圆曲线扩散形式在抽水工况下,弯管段和直管段对水流的调整作用有限,在直管段内水流存在明显的偏流。水流经过椭圆扩散段后仍存在明显的偏流现象,正对来流方向的 1 号、8 号孔口流量分配占比分别为 27. 69%、27. 58%,2 号、7 号孔口流量分配占比分别为 22. 14%、22. 59%,孔口流量分配占比最大 27. 69%,背对来流方向的 4 号、5 号孔口流量分配占比几乎为 0,孔口流量分配情况近似沿引水隧洞轴线对称分布。3°锥管扩散体型下孔口出流流量占比在 12. 31%~12. 76%之间;4°锥管扩散体型下孔口出流流量占比在 12. 10%~12. 80%之间;5°锥管扩散体型下孔口出流流量占比在 12. 16%~12. 92%;6°锥管扩散体型下孔口出流流量占比在 12. 33%~13. 03%。

相比 1/4 椭圆曲线扩散,锥管扩散体型下的 8 个孔口出流情况更加均匀。这是因为锥管体型能对经过直管段后的水流起到调整作用。随着锥管扩散角的增大,出流的不均匀性在增加,在 6°锥管扩散体型时,孔口出流占比最大值已有 13. 03%。图 6 为不同扩散段体型下直管段中部以及孔口底板下 0. 5 m 位置处的流速云图。由图 6 可知,5 种扩散段体型在直管段中部的流速分布相似,在扩散段顶部,1/4 椭圆曲线扩散体型出现了流速分布不均匀的现象,锥管扩散体型流速分布很均匀。随着锥管扩散角的增大,逐渐出现偏流现象,在 6°锥管扩散体型下,已明显可以看出正对来流方向的管壁处流速变大。

竖井式进出水口的水头损失指图 1 所示渐变段后 1. 5D 处引水隧洞上截面 1—1,和上水库水面 0—0 之间的单重量水体的能量减少,包括渐变段、弯管段、直管段、扩散段、分流墩及盖板部位的水头损失。1/4 椭

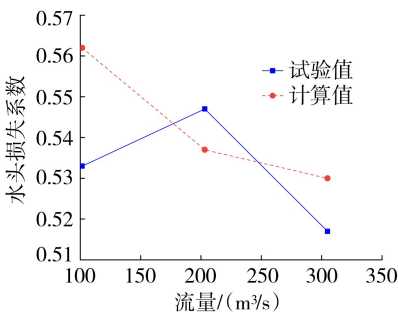


图 3 溧阳抽水蓄能电站上库竖井式进/出水口抽水工况水头损失系数计算值与试验值对比

Fig. 3 Comparison between calculated and experimental values of head loss coefficient of the upper reservoir shaft-type inlet/outlet of Liyang pumped storage power station under pumping condition

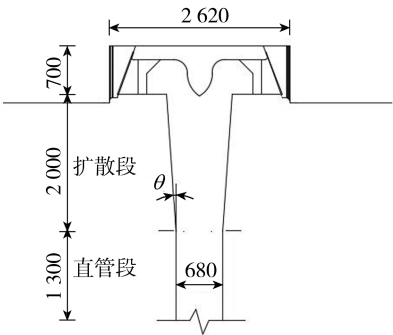


图 4 锥管扩散体型 (单位:cm)

Fig. 4 Conical diffuser (unit: cm)

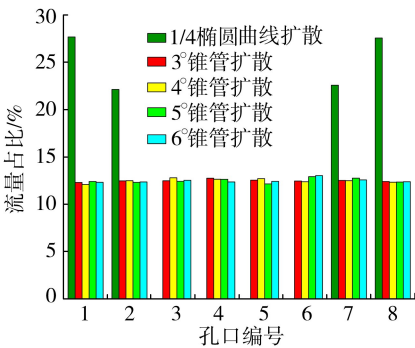


图 5 不同扩散段体型的孔口流量分配

Fig. 5 Flow distribution at orifices for diffusers with different geometries

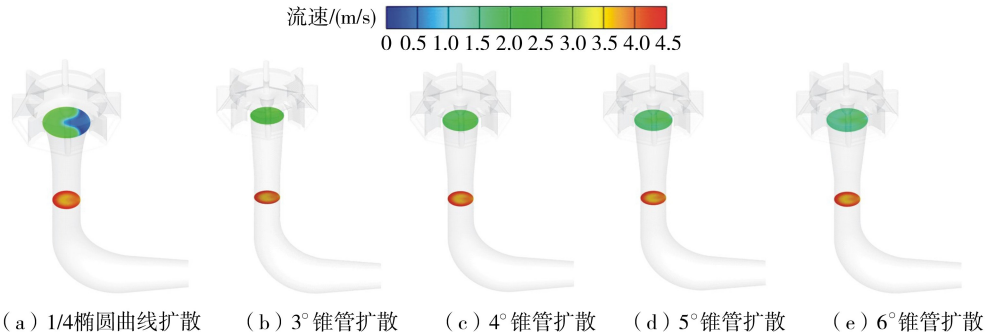


图 6 管道流速分布云图

Fig. 6 Contour of pipeline velocity distribution

圆曲线扩散体型水头损失系数为 0.449,3°锥管扩散体型水头损失系数为 0.604,随着锥管扩散角的增大水头损失系数减小(4°、5°锥管扩散体型分别为 0.501、0.436),在 6°扩散角时,减小至 0.386,降低幅值 36.09%。3°、4°锥管扩散体型水头损失系数大于 1/4 椭圆曲线扩散体型,原因在于小角度扩散角的锥管与椭圆体型相比对出流的调整幅度更大,消耗的水流能量更多,在改善出流均匀性的同时也造成水头损失的增加。随着扩散角度的增加,锥管对水流的调整作用减弱。

5 种扩散段体型中,3°锥管扩散体型下的孔口出流均匀性最好,各孔口的流量分配占比十分接近均值(12.50%)。相比之下,4°和 3°锥管扩散体型相差不多却更好地降低了水头损失系数,降低幅值达 17.05%。锥管扩散角的增大加剧了孔口出流的不均匀性,在 5°扩散角时,孔口出流占比最大值已接近 13.00%。综上,锥管扩散角宜控制在 4°~5°之间。

3.2 锥管与孔口底板连接方式的影响

为研究锥管扩散体型下,锥管与孔口底板连接方式的影响,在 4°扩散角的锥管扩散体型基础上,分别研究了以下连接方式:在锥管与孔口底板连接处带有 0.5、1.0、2.5、3.0 m 半径圆弧连接段,如图 7 所示。

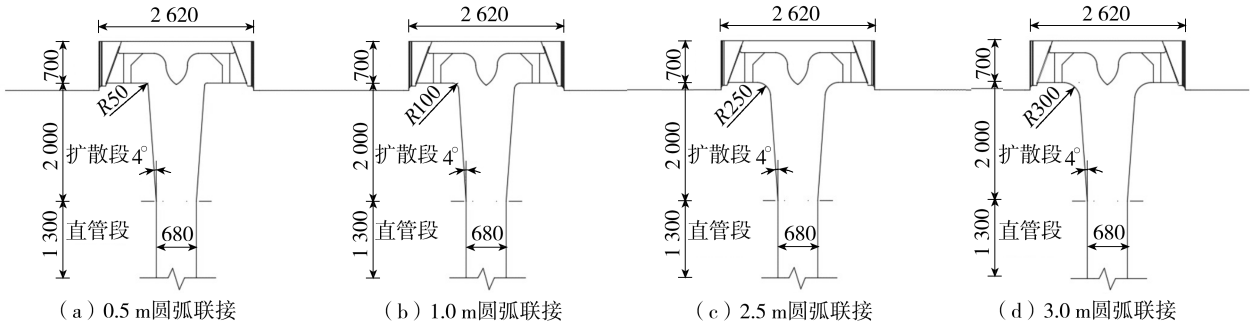


图 7 圆弧连接段体型示意图(单位:cm)

Fig. 7 Geometry of arc connection (unit: cm)

图 8 为不同圆弧连接方式下,竖井式进/出水口 8 个孔口的流量分配情况,并与不带圆弧连接段的 4°锥管扩散体型(图 4)的结果进行对比。由图 8 可知,随着圆弧连接段半径的增大,进/出水口的 8 个孔口流量分配朝不均匀方向发展。0.5 m 半径圆弧连接体型下出流均匀性良好,与无圆弧连接体型下的出流均匀性接近,各孔口流量占比在增加圆弧连接段前后相差不超过 0.28%。当圆弧连接段半径达 2.5 m 之后,孔口流量占比在 3.75%~22.43%之间,孔口流量分配已非常不均匀。

锥管无圆弧连接、0.5 m 半径圆弧连接、1.0 m 半径圆弧连接、2.5 m 半径圆弧连接、3.0 m 半径圆弧连接的水头损失系数分别为 0.501、0.408、0.362、0.341、0.337。随着圆弧连接段的半径增大,水头损失系数进一步降低,其中圆弧连接段半径在

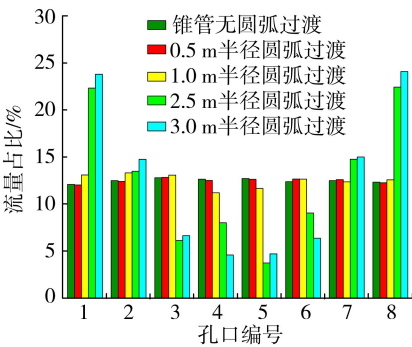


图 8 不同连接方式下的孔口流量分配

Fig. 8 Flow distribution at orifices for different connection methods

2.5 m 后,水头损失系数降低的幅度减小。由图 9 可知,当圆弧连接段半径达 2.5 m 时,扩散段出口处的流速分布已开始不均匀。是否有圆弧连接段,对于锥管扩散下的出流影响明显,原因在于圆弧连接段的存在,减少了对出流的调整作用,其作用机理与增大锥管扩散角相似。出流流道的改变,降低了出流过程中的局部水头损失;但流道对出流的调整减弱,也对出流均匀性造成影响,不均匀程度随对出流的调整程度减弱而增大。连接段圆弧半径取值宜控制在 $0.15D_2$ 内(D_2 为锥管进口断面直径,为 6.8 m)。

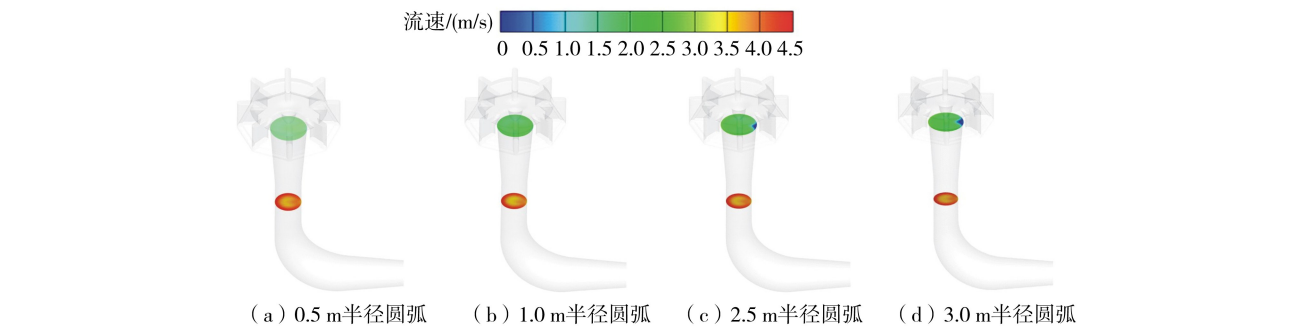


图 9 不同圆弧连接方式下的管道流速云图

Fig. 9 Contours of pipeline velocity for different arc connection methods

4 结 论

- a. 抽水工况下,竖井式进/出水口锥管扩散段体型对各个孔口的流量分布的均匀性具有重要的作用。1/4 椭圆曲线扩散体型下,进/出水口出流流量占比最小值几乎为 0,最大值高达 27.69%;相比之下,锥管扩散体型下,进/出水口 8 个孔口的流量分配百分比都接近均值 12.50%。合理扩散角的锥管扩散体型对出流的调整幅度明显大于椭圆曲线扩散体型。
- b. 锥管的扩散角对竖井式进/出水口出流时的水头损失系数及各孔的流量占比的均匀性具有较明显的影响。扩散角的增大虽然能减小竖井式进/出水口出流时的水头损失,但会降低对出流的调整作用,降低各孔口出流时流量分布的均匀性。当扩散角从 3°增大至 6°时,水头损失系数从 0.604 降至 0.386,降低幅度 36.09%;扩散角的增大对竖井式进/出水口的水头损失系数和出流时各孔口流量分配的均匀性的效果相矛盾。当扩散角从 3°增大至 6°时,孔口流量占比最大值从 12.76%增至 13.03%。锥管扩散体型可通过改变扩散角的形式改变出流的水力特性,扩散角宜控制在 4°~5°。
- c. 锥管与孔口底板连接方式对于竖井式进/出水口的出流时的水力特性影响明显。采用圆弧连接段时,随着圆弧半径的增加,出流的均匀性变差,但水头损失系数相比无圆弧连接段的锥管体型明显降低。当圆弧半径增大至 $0.15D_2$ 之后,出流均匀性及水头损失系数变化幅值降低。

参考文献:

[1] 李北晨. 考虑新能源消纳的抽水蓄能服务电网能力评估及规划研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.

[2] SHI Xiaofei, QIAN Yu, YANG Siyu. Fluctuation analysis of a complementary wind-solar energy system and integration for large scale hydrogen production[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(18): 7097-7110.

[3] PÉREZ-DÍAZ J I, CHAZARRA M, GARCÍA-GONZÁLEZ J, et al. Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 767-784.

[4] 彭程, 彭才德, 高洁, 等. 新时代水电发展展望[J]. 水力发电, 2021, 47(8): 1-3. (PENG Cheng, PENG Caide, GAO Jie, et al. Prospects for hydropower development in a new development stage in China[J]. Water Power, 2021, 47(8): 1-3. (in Chinese))

[5] 贡力, 董洲全, 贾治元, 等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 1-9. (GONG Li, DONG Zhouquan, JIA Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 1-9. (in Chinese))

[6] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021 年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 1-4. (HAN Dong, ZHAO Zenghai, YAN Bingzhong, et al. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021[J]. Water Power, 2022, 48(5): 1-4. (in Chinese))

[7] 周建平, 杜效鹄, 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))

[8] 丁光旭,田思源,方国华,等. 不同市场环境下贵州省抽水蓄能电站的电价形成机制研究[J]. 水利经济, 2024, 42(2): 73-78. (DING Guangxu, TIAN Siyuan, FANG Guohua, et al. Study on electricity price formation mechanism of pumped storage power station under different market environments [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(2): 73-78. (in Chinese))

[9] 张博庭. 我国水电的发展与能源革命电力转型[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 69-78. (ZHANG Boting. Hydropower development, electric power transformation and energy revolution in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8): 69-78. (in Chinese))

[10] 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))

[11] 程欢,蔡付林,张宗溥. 不同湍流模型的电站进/出水口数值模拟[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 107-109. (CHENG Huan, CAI Fulin, ZHANG Zongpu. Numerical simulation on inlet/outlet in the lower reservoir of pumped storage station based on different turbulence models [J]. Yellow River, 2015, 37(3): 107-109. (in Chinese))

[12] 张晓曦,程永光,刘畅. 抽水蓄能电站竖式进/出水口 CFD 水力优化[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 87-94. (ZHANG Xiaoxi, CHENG Yongguang, LIU Chang. Simulation and optimization of flow characteristics in vertical inlet/outlet of pumped-storage power station by CFD method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 87-94. (in Chinese))

[13] 张晨,李天国,高学平. 竖井式进/出水口工程尺度 SPH 方法模拟研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 34-45. (ZHANG Chen, LI Tianguo, GAO Xueping. Real-scale 3D modeling of hydraulic characteristics of vertical inlet and outlet using SPH method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 34-45. (in Chinese))

[14] MARTINERIE R, MÜLLER M, DE CESARE G, et al. Vortices at intake works of pump-storage schemes [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering. Prague: Czech Technical University in Prague-Institute of Hydrodynamics AS CR, 2008: 119-122

[15] AMIRI S M, ROSHAN R, ZARRATI A R, et al. Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates [J]. Water and Eenergy International, 2011, 68(5): 193-200.

[16] TAHERSHAMSI A, RAHIMZADEH H, MONSHIZADEH M, et al. A new approach on anti-vortex devices at water intakes including a submerged water jet [J]. The European Physical Journal Plus, 2018, 133(4): 143.

[17] 高学平,宋慧芳,张效先,等. 西龙池抽水蓄能电站竖井式进/出水口体型研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(2): 34-37. (GAO Xueping, SONG Huifang, ZHANG Xiaoxian, et al. Study on the vertical pipe intake of Xilongchi pumped storage plant [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(2): 34-37. (in Chinese))

[18] 章军军,孙志林,毛根海,等. 抽水蓄能电站竖井式进出水口水力试验研究及数值模拟[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 85-89. (ZHANG Junjun, SUN Zhilin, MAO Genhai, et al. Experimental study and numerical simulation of the vertical pipe inlet-outlet of pumped storage plant [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 85-89. (in Chinese))

[19] 张翰. 竖井式进/出水口水力特性及体型优化研究[D]. 天津:天津大学, 2020.

[20] 刘际军,高学平. 竖井式进/出水口布置形式对水流特性的影响[J]. 水利水电技术, 2015, 46(11): 110-114. (LIU Jijun, GAO Xueping. Impact from layout for shaft intake and outlet on flow characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(11): 110-114. (in Chinese))

[21] 高学平,刘际军,张翰,等. 具有弯道的竖井式出水口水流均匀性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 63-69. (GAO Xueping, LIU Jijun, ZHANG Han, et al. Study on flow uniformity at bend outlet of drop shaft structure [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 63-69. (in Chinese))

[22] 程伟平,章军军,陈益民,等. 超短竖井式进/出水口水力控制[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(5): 548-552. (CHENG Weiping, ZHANG Junjun, CHEN Yimin, et al. Hydraulic control of super short vertical well entry/draft tube [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5): 548-552. (in Chinese))

[23] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.