

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220415

泵站双节式拍门门后水流流态分析

付国丛¹, 陈 华¹, 周秉南¹, 刘健峰¹, 夏 辉², 陆伟刚¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要: 为深入了解双节式拍门不同开启角度对出流的影响,以某泵站的双节式拍门为例,选取在实际工程中大量使用的4种开启角度方案,利用数值模拟方法对双节式拍门在不同流量下的门后水流流态进行了三维模拟计算,分析了水流流线、流速均匀度和涵管内水力损失三个指标对水流流态的影响。结果表明,出水涵管沿程阻力损失系数与开启角度呈负相关关系,拍门开启角度越大,出水涵管内水流的水力损失越少,且随流量的增大越来越明显,流量为 $2\text{ m}^3/\text{s}$ 时方案4与方案1相比水力损失下降了49.6%,流量为 $16\text{ m}^3/\text{s}$ 时方案4较方案1水力损失下降了79.1%;涵管内流态与开启角度呈正相关关系,拍门开启角度越大,涵洞内水流流态越好,当拍门的开启至方案3上拍门 46° 、下拍门 64° 后,涵洞内水流状态已趋于较优状态。

关键词: 双节拍门; 门后水流; 流态分析; 数值模拟; 泵站

中图分类号: TV136⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0162-04

1 引言

拍门为泵站运行过程中的重要一环,其作用为在泵站结束运行后,利用自身重力及水流的压力自行落下对出口外水流进行阻断防止出口处水流倒流。比较常见的拍门型式有整体式拍门、双节拍门、多扇式拍门、悬吊式拍门、侧向单开式拍门、侧向双开拍门等。目前,关于泵站及拍门方面的研究已较多,如杨帆等^[1]应用CFD软件分析了某泵装置有、无拍门的出流流态;于永海等^[2]利用数值模拟分析了泵站后压力水箱内的水流流场;洪顺军等^[3]利用数值模拟分析了上翻式和侧翻式拍门的流态;游峻松等^[4]运用紊流模型结合6DOF算法,模拟出上翻式拍门的开启过程,并研究了拍门在开启过程中的水力特性;唐敏嘉等^[5]利用Fluent软件模拟正常运行工况下的拍门不同开启角度对应的流态,并研究了拍门动作过程中的水力损失系数;谢荣盛等^[6]运用CFD软件对含悬挂式小拍门闸门的流动状况进行了数值模拟计算,对比分析了不同拍门方案下的水力损失系数分布和内部流线;ZHOU B等^[7]利用模型试验结合数值模拟探究了水流经过双节拍门时的水力

损失;ZHU H等^[8]通过物理模型试验研究了双节拍门的水头损失系数,并以此推导了双节拍门水头损失系数的经验公式。目前,关于拍门运行模拟的优化研究多采用数值模拟或物理试验,且大多均针对拍门部件附近,而对拍门门后流态的研究较少。为此,本文以某泵站的双节式拍门为例,利用数值模拟方法,从流速均匀度、流线及拍门后出水涵管的水力损失三方面分析了其水流流态,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

2 研究方法

2.1 数值模拟

数值模拟采用不可压缩流体的连续性方程和雷诺时均N-S方程及Realizable $\kappa-\epsilon$ 模型,方程的数值解法采用分离半隐式压力耦合算法。数值模拟计算进口断面控制采用速度进口条件,水体速度为 1.778 m/s 。选取穿路涵洞的出口作为计算的出口断面,设置出流方式为自由出流,相对压力为一个标准大气压,将其余面设置为固壁表面,并将拍门单独设置为一个结构面。首先对模型进行整体网格划分,再对拍门进行局部加密,以网格总数的1.2倍逐渐递增进行无关性分析,将不同网

收稿日期: 2022-03-06, 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779215, 52079120)

作者简介: 付国丛(1996-),男,硕士研究生,研究方向为水工结构, E-mail: 1351017126@qq.com

通讯作者: 陆伟刚(1964-),男,博士、教授,研究方向为工程水力学与水工结构优化设计, E-mail: wglu@yzu.edu.cn

格下双节式拍门的水力损失取出,当网格数超过 899 721 个时水力损失基本趋于稳定,选用此情况下的网格尺寸作为划分依据,即整体结构网格最大尺寸为 0.2 mm,拍门处最大尺寸为 0.05 mm。

2.2 模型设计

某泵站的双节式尺寸见表 1。依据泵站相关数据建立计算模型,从 0 开始到 16 m³/s 每隔两个流量设置一个运行工况,用数值方法模拟各工况下不同拍门开启角度的门后水流流态并进行分析,结果表明流量为 16 m³/s 工况下流态较差,出现问题较多,特选取此工况进行研究。利用 UG 软件建立三维立体模型,图 1 为泵站立面图,图 2 为计算区域示意图。

表 1 双节式拍门尺寸

Tab. 1 Dimensions of two-stage flap valves m

序号	名称	尺寸	序号	名称	尺寸
1	拍门宽度	3.24	3	拍门总高度	3.30
2	上节门页高度	1.70	4	上节门页高度	1.20

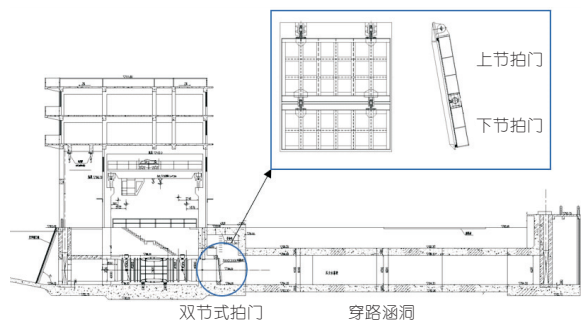


图 1 泵站站身及穿路涵洞立面图

Fig. 1 Elevation of pump station body and road crossing culvert

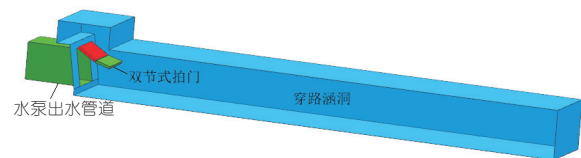


图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation area

2.3 断面流速均匀度

拍门开启角度直接影响门后水流流态,因此设计拍门时需考虑水流在涵洞内完全发展,且在到达涵洞出口处时流态要相对稳定,流速分布需相对均匀。在涵洞段每隔 6 m 选取一个计算断面,采用流速均匀度对涵洞内水流流态发展进行量化分析。计算公式为:

$$\eta = \left[1 - \bar{v}_a^{-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2}{n}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中, \bar{v}_a 为平均轴向流速; v_{ai} 为各个计算单元的轴向流速; n 为单元数。

2.4 出口涵洞段水力损失

某泵站工程涵洞段后紧邻一个闸站前池,增加双节拍门后必然会对涵洞内水流影响很大,因此运用 ANSYS 进行数值模拟,分析不同拍门开启角度与涵洞水力损失的变化情况,探究沿程阻力系数 λ 与拍门开启角度及流量的关系,水力损失 h_f 计算公式为:

$$h_f = (p_2 - p_1) / (\rho g) \quad (2)$$

式中, p_1 、 p_2 分别为断面 1、2 的总压力; ρ 为水的密度; g 为重力加速度。

2.5 方案选择

为分析拍门开启角度对门后涵洞水流流态的影响,从 0 开始到 16 m³/s 每隔两个流量设置一个运行工况,分析每种工况下 4 种不同拍门开启角度时出水涵洞的流态。各角度开启方案见表 2。

表 2 各方案的双节式拍门开启角度

Tab. 2 Two-stage flap valves opening angle of each scheme

方案	上节门角度 $\alpha / (^\circ)$	下节门角度 $\beta / (^\circ)$	方案	上节门角度 $\alpha / (^\circ)$	下节门角度 $\beta / (^\circ)$
1	15	32	3	46	64
2	33	55	4	53	70

3 试验结果与分析

3.1 流场分析

以泵站设计流量 16 m³/s 为例对 4 个方案下门后涵洞内水流进行模拟,得出其流场分布图,研究水流出拍门后的水流流线变化(图 3),并观察涵洞出口断面处的流速矢量图(图 4)。

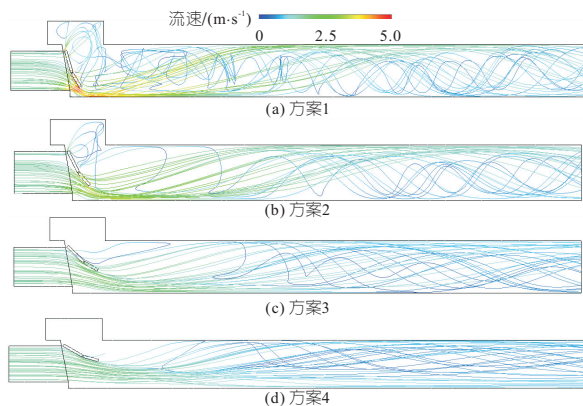


图 3 涵洞段水流流线图

Fig. 3 Flow line diagram of culvert section

由图 3 可知,在拍门开启角度很小时,涵管内水流呈螺旋状,流线杂乱,且压力箱涵内会出现水流滞留现象,并伴有漩涡出现。随拍门开启角度增大,水流流线逐渐变得顺直,流线不再紊乱,压力箱涵内亦无水流滞留的现象。

由图 4 可知,方案 1 中,断面内存在沿轴向对

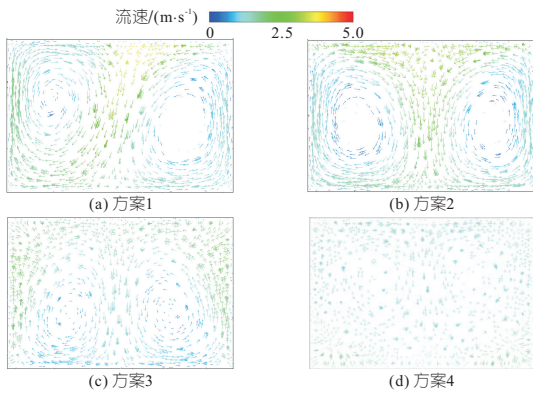


图 4 涵洞出口处流速矢量图

Fig. 4 Vector diagram of flow velocity at culvert outlet

称的两个反向涡,高流速区分布于两侧漩涡上部,且在涵管上侧中部进行碰撞,使得流速矢量较为密集的集中于此,流态较差;方案 2 时,两侧涡漩位置逐渐下移,涡漩的碰撞区域变大,延展至上侧的 T 型区域,涡漩逐渐对称,流态仍较差;随拍门持续开启,漩涡逐渐减小,流态逐渐变好;方案 3 时漩涡进一步缩小,涡漩碰撞区域进一步变大,高流速区扩散至上部 M 型区域,低速涡区被压缩在涵管中下方,高速区偏向下侧整体流速矢量下降,当开启角度到达方案 4 时,断面整体流速降低,漩涡范围变小,无明显高流速区。

3.2 轴向断面流场分析

选取流量为 $16 \text{ m}^3/\text{s}$ 的工况分析拍门开启角度对流速均匀度的影响,见图 5。由图 5 可知,方案 1 中,水流经过拍门,流态较为紊乱,流速分布不规律,在离开拍门后,水流呈现上下滚动的趋势,高流速区逐渐向上侧移动,并在涵管后侧切面的两侧形成反向涡漩,在出口处两侧反向涡分布亦移动至上侧,且分布不对称;方案 2 中,进口高流速区主要被压缩于下侧,在向出口移动过程中高流速区由涵管下侧沿两侧逐渐向上侧蔓延,在涵管中部两侧低速涡漩形成,出口处低流速区聚集于两侧,且较方案 1 两侧涡漩范围变大;方案 3 中进口下侧的高流速区范围逐渐增大,高流速区沿两侧逐渐向上侧蔓延,并在涵管中前部形成两侧的低速涡漩,出口低流速区范围进一步增大,流

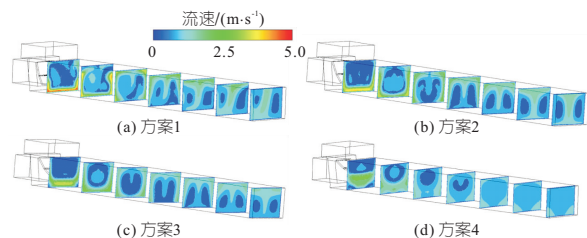


图 5 涵洞内选取的研究断面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of selected research section in culvert

速梯度减小;方案 4 中,进口高流速区范围进一步扩大,高流速区上移位置进一步提前,在涵管中部水流趋于稳定,且出口流速分布均匀,整体流速较低,无明显流速梯度。

3.3 流速均匀度分析

将各方案下计算的流速均匀度结果绘制成曲线并与无拍门工况进行对比,结果见图 6。

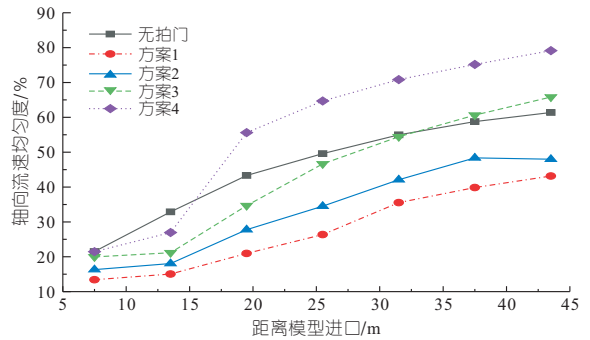


图 6 各方案下计算断面轴向流速均匀度变化曲线图

Fig. 6 Curve diagram of uniformity variation of axial flow velocity in computed sections under different schemes

由图 6 可知,各方案下的流速均匀度均随距离的增大在逐渐提升。方案 1 在拍门开度较小的工况下,整体流速均匀度处于较低水平,但随着水流逐渐远离拍门流速均匀度缓步提升,而方案 2 中,整体流速均匀度略有提升,但与方案 1 相同,处于较低水平且远离拍门时流速均匀度逐渐上升。在方案 3 中,在距离拍门 14 m 处流速均匀度提升明显,且在 33 m 处流速均匀度超过无拍门方案,说明涵洞内流态得到改善,而在方案 4 中,流速均匀度在 14.0~19.5 m 之间迅速提升,并维持在高于无拍门方案的水平平稳增长,此时涵洞内流态得到了显著的改善。由此可知,当开启角度达到方案 3、4 时,在涵管出口处水流流态已可达到较好状态。

3.4 水力损失分析

计算 8 种不同流量下 4 种拍门开度方案时的出水涵管水力损失,并分析其规律,各方案下涵管水力损失结果见图 7,同时计算各方案下管路沿程阻力系数 λ ,分析各流量下 λ 与拍门开启角度的关系,计算结果见图 8。

由图 7 可知,4 种方案各流量下的水力损失均随拍门的开启而减小;且随开启角度增大流量增长所带来的水力损失的增加越来越小。以设计流量 $16 \text{ m}^3/\text{s}$ 为例,拍门开启角度为方案 1 时水力损失值为 0.353 m,而开启角度为方案 4 时水力损失为 0.074 m,较之下降了 79.1%。

由图 8 可知,在同一开启角度下,涵管段沿程阻力系数 λ 与流量变化无关,始终稳定在恒定数

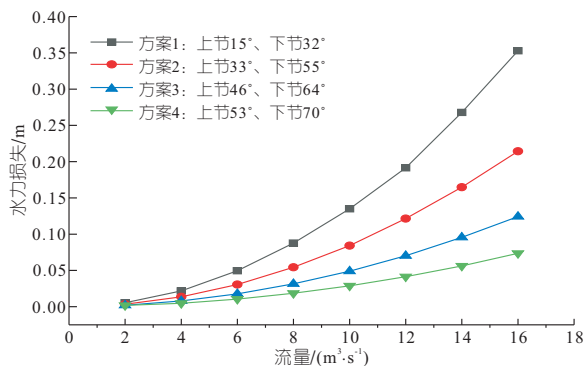


图 7 各方案下涵管水力损失变化曲线图

Fig. 7 Change curve of culvert head loss under each plan

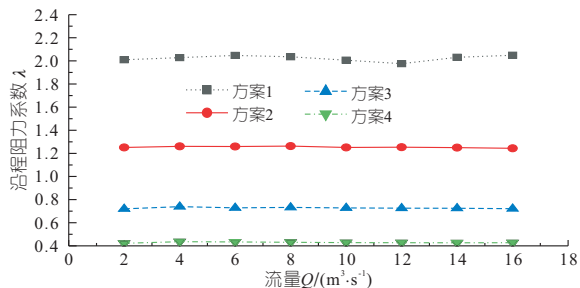


图 8 各方案下沿程阻力系数变化曲线图

Fig. 8 Curve of variation of drag coefficient along the route under each scheme

值。但随开启角度增加,沿程阻力系数却减小,这说明拍门开启角度越大,涵管内沿程阻力系数越小,水力损失也就越少。

综上所述,随拍门开启角度的增大,涵管内水力损失明显减小,涵管内水流流态则越好;拍门开启角度对门后涵管段水流的影响非常大,且开启角度越大涵管段水流流态越好。

4 结论

a. 双节式拍门开启后,门后涵管段水流出现两条轴对称反向漩涡,随拍门开启角度增大,拍门后涵管内水流流线逐渐顺直高流速区下移并逐渐

Analysis of Flow Pattern Behind Two-stage Flap Valves of Pumping Station

FU Guo-cong¹, CHEN Hua¹, ZHOU Bing-nan¹, LIU Jian-feng¹, XIA Hui², LU Wei-gang¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to deeply understand the impact of the alteration of different opening angles of the two stage flap valves on outflow, a two-stage flap valve of a certain pumping station was taken as an example. Choosing four opening angle schemes widely used in practical projects, the three-dimensional flow pattern behind the two stage flap valve under different flow rates was simulated. The influence of flow streamline, velocity uniformity and hydraulic loss in culvert on the flow pattern was analyzed. The results show that the resistance loss coefficient along the outlet culvert is inversely correlated with the opening angle, to be specific the larger the opening angle of the flap valve, the less the hydraulic loss of the water flow in the outlet culvert pipe, and disparity degree becomes more obvious with the increase of the flow rate. When the flow rate is $2 \text{ m}^3/\text{s}$, the hydraulic loss of the outlet culvert pipe in scheme 4 decreases by 49.6% compared to that of scheme 1; When the flow rate is $16 \text{ m}^3/\text{s}$, the hydraulic loss of the outlet culvert pipe in scheme 4 decreases by 79.1% compared to that of scheme 1. To conclude, the larger the opening angle of the flap valve, the better the flow pattern in the culvert and when the flap valve is opened to 46° for the upper flap valve and 64° for the lower flap valve in scheme 3, the flow pattern in the culvert has tended to a better state.

Key words: two-stage flap valves; flow pattern on the rear side of the flap valves; flow pattern analysis; numerical simulation; pumping station

消失,出口处水流漩涡逐渐消散。

b. 流速均匀度随水流远离拍门而逐渐提高。当拍门角度至上拍门 46° 、下拍门 64° 时,流速均匀度已与无拍门工况下相近,而在上拍门 53° 、下拍门 70° 时,整体流态已优于无拍门工况。

c. 涵管段水力损失系数与流量的大小无关,与拍门的开启角度呈负相关关系,拍门开启角度越大,涵管段水力损失系数越小,水力损失亦越小。

d. 双节式拍门开度对门后涵洞内水流影响很大,且开度越大流态越好。

参考文献:

- [1] 杨帆,周济人,刘超. 泵装置拍门阻力损失数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(9):108-112,44.
- [2] 于永海,朱君妍. 基于数值试验改善泵站压力水箱内拍门断流性能[J]. 中国农村水利水电,2014(6):125-128.
- [3] 洪顺军,李志鹏. 上翻式和侧翻式拍门水力特性对比研究[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):306-308,329.
- [4] 游峻松,周大庆,郭俊勋,等. 上翻式拍门开启过程的水力特性研究[J]. 中国农村水利水电,2022(11):91-96.
- [5] 唐敏嘉,李桑军,秦战生. 上翻式与侧翻式拍门动作过程中的水力损失系数研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(3):396-399,420.
- [6] 谢荣盛,项春,陈圆圆,等. 基于CFD的含小拍门的闸门过流能力分析[J]. 水电能源科学,2018,36(12):156-158.
- [7] ZHOU B, LU W, XU B, et al. Numerical simulation and experiment of hydraulic loss of two-stage flap valves[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Green Energy, Environment and Sustainable Development (GEESD2021). IOS Press, 2021, 17: 351.
- [8] ZHU H, FENG H. Model study on the head loss coefficient of two-stage flap valves[J]. Journal of hydraulic engineering, 1996.