

泵站虹吸式出水管虹吸形成时间特性分析 及其改善措施

冯建刚,温陈碧,王晓升

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:由于虹吸式出水管虹吸形成时间的长短直接影响泵站能否安全稳定运行,为研究虹吸形成时间特性及虹吸管改善措施对虹吸形成时间的影响,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和结构化网格对某一泵站虹吸式出水管进行数值模拟。数值模拟结果表明:水力驱气阶段持续时间与进流流量有关;水力挟气阶段排气速率与水气交界面处流速大小有关;虹吸形成过程中上下气囊的产生对于虹吸形成十分不利,在驼峰顶部设置分流板能有效改善虹吸管内流速分布,加速顶部气囊的排出,缩短虹吸形成时间,且对水力损失影响极小。

关键词:泵站;虹吸式出水管;虹吸形成时间;数值模拟;改善措施

中图分类号:TV732 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0088-07

Analysis on siphon formation time characteristics and improvements for siphon outlet conduit in a pump station//
FENG Jiangang, WEN Chenbi, WANG Xiaosheng (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The safety operation of a pump station is directly affected by the siphon formation time of a siphon outlet pipe. In order to investigate the siphon formation time characteristics and the impact of the improvement on siphon formation time, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model with structured grids were used to simulate the siphon outlet pipe of a pump station. The numerical simulation results show that the duration of the hydrodynamic phase is related to the inflow flux. In the hydroponic phase, the exhausting rate is related to the velocity at the water air interface. During the siphon formation process, the generation of airbags is very unfavorable for the siphon formation and configuration of a splitter plate at the top of the hump section can effectively improve the flow rate distribution in the siphon, which can accelerate the discharge of the airbags, shorten the siphon formation time and minimize the influence on the hydraulic loss.

Key words: pump station; siphon outlet pipe; siphon formation time; numerical simulation; improvement measures

虹吸式出水管是泵站出水系统的重要组成部分,由于其关机断流安全可靠的优点,在扬程较低的大型立式和斜式泵站工程中应用广泛。虹吸形成过程的本质是水流充满管段,将空气排出管外并使驼峰段形成真空的过程,此过程包括水力驱气、水力挟气和虹吸形成3个阶段^[1]。水泵排出水流进入虹吸式出水管,使管内水位逐渐上升,水流翻过驼峰形成堰流,将靠近溢流面的空气卷入水中并挟带逸出,最终水流充满整个管道,虹吸形成。若虹吸形成时间过长甚至最终未能形成满管流,或者虹吸形成过程中水力损失过大,则会造成扬程偏高、机组震动等危害,影响泵站的安全、高效运行^[2]。关于虹吸式出水管虹吸形成过程的研究,杲东彦等^[3]、朱红耕

等^[4-7]对不同的虹吸式出水管进行了三维紊流数值模拟,结果表明,虹吸式出水管内的流速分布大多不均匀,特别在驼峰段和下降段,水流急剧转向,易在管道下降段下侧形成较大范围的脱流,并在管道的出口附近形成一个体积较大的旋涡,导致水力损失的增加。而在虹吸管水力优化设计方面,仲付维^[8]、楼玉先^[9]结合模型试验对泵站虹吸管驼峰真空度的计算及控制进行了深入的分析研究,提出了虹吸管驼峰真空度的确定方法,完善了驼峰真空值的计算公式。

本文结合某典型泵站的虹吸式出水管,运用数值模拟的方法对泵站虹吸式出水管进行三维流场计算,分析其虹吸形成时间特性,并对其进行水力优

化,研究改善措施对于虹吸形成时间的影响,为虹吸式出水管的优化设计提供借鉴。

1 模型的建立

以某典型排水泵站工程的虹吸式出水管为研究对象,设计流量 $Q_d=3.00\text{ m}^3/\text{s}$,扬程 $H=13\text{ m}$ 。该泵站虹吸式出水管分为弯管段、上升段、驼峰段、下降段和出口段 5 个部分,其中弯管段和上升段为圆形截面,驼峰段、下降段和出口段为矩形截面,具体布置及尺寸参数如图 1 所示。

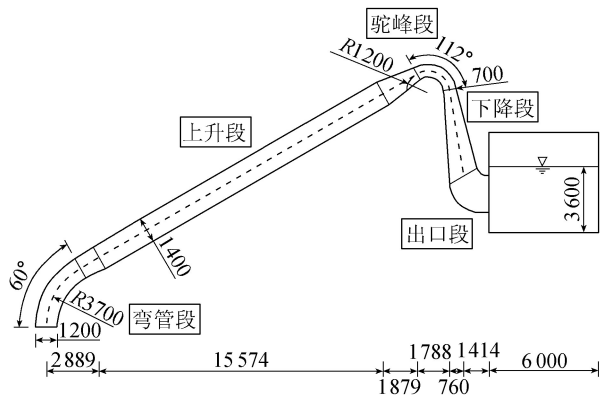


图 1 虹吸式出水管布置形式 (单位:mm)

虹吸式出水管内的水流流动可视作三维不可压缩黏性湍流,控制方程为动量方程和连续性方程。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (1)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中: $\overline{p}$ 为平均压力; ρ 为流体密度; μ 为运动黏滞系数; $\overline{u_i}$ 为时均速度分量; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力; x_i, x_j 为坐标向量。

两相流模型控制方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$
$$G_k = \mu_t [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \nabla \mathbf{u}$$
$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + 0.012 \eta^3}$$
$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad S = \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}} \quad \overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为流速; k 为湍动能; ε 为耗散率; μ_{eff} 为有效

混合黏度; μ_t 为涡黏系数; G_k 为由于黏性力导致的湍动能产生项; S 为平均应变率张量系数。常数项有: $C_\mu = 0.0845, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{1\varepsilon} = 1.68, \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.75, \eta_0 = 4.38$ 。

由于虹吸式出水管水力挟气阶段为复杂的气液两相流,水流流线弯曲程度较大,而 RNG $k-\varepsilon$ 模型源于重正化群理论的统计方法,其对于强旋流和旋转流动有很好的适应性^[10-12],故采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对其进行数值模拟。

模型计算域包括弯管段、上升段、驼峰段、下降段、出口段和出水池 6 个部分,采用六面体网格进行划分,其中弯管段和上升段采用“O”形网格进行处理。虹吸式出水管的进口采用流量进口;出水池挡水墙上方设置为压力出口;出水池大气进口设置为压强出口;避免采用无滑移壁面边界。初始时刻出水池出水侧挡水墙拦蓄区域为水,出水池水位以上及虹吸管上升段区域为空气。

数值计算采用有限体积法对控制方程进行离散,使用全隐式多网格耦合的方法,同时对流场和控制方程进行求解。数值计算步长为 0.05 s,计算总时长为 60 s。为保证网格数量的合理性,基于设计流量运行工况,结合泵站现场测试数据^[13]进行网格无关性分析,结果如表 1 所示。现场测得,当此虹吸式出水管虹吸的形成过程完成后,驼峰断面的稳定真空度为 4.80 m,数值计算值和现场测试值的差距随网格数的增加而减小,当网格总数大于 58.0×10^4 时,数值计算值与现场测试值偏差小于 2%,两者基本吻合。综合考虑计算成本和计算精度,最终确定网格总数约为 58.0×10^4 。

表 1 网格无关性分析

方案序号	网格数/ 10^4	稳定真空度/m	与原型测试值偏差/%
1	11.3	5.06	5.4
2	23.7	4.98	3.8
3	58.0	4.89	1.9
4	108.7	4.84	0.8

2 虹吸形成时间特性分析

2.1 虹吸形成过程

虹吸管虹吸形成过程为泵站启动时,水泵开机到虹吸作用完成的过程,此过程包括水力驱气、水力挟气和虹吸形成 3 个阶段^[14-15]。图 2 为设计流量下,虹吸管虹吸形成过程的水气混合过程。

水泵启动后,随着水流进入虹吸式出水管,管内水面逐渐上升,水流流速平缓。管内空气所受压强增大,迫使其于虹吸管出口上方形成一个细长的排气通道,如图 2(a) 所示,出水池水面因此轻微波动。

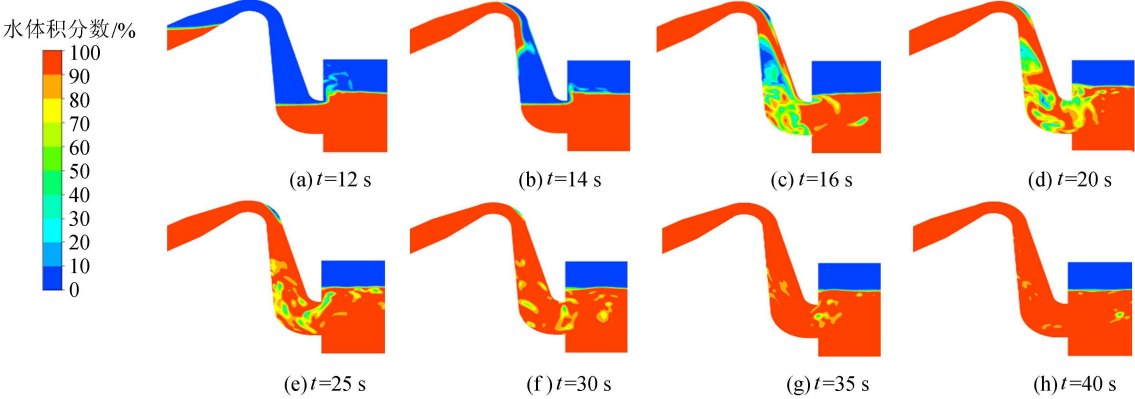


图2 $Q=Q_d$ 时虹吸管虹吸形成过程

当 $t=13.1\text{ s}$, 虹吸管内水面与驼峰段底部齐平后水流翻过驼峰段形成堰流。如图 2(b) 所示, 水流在翻过驼峰段后迅速跌落, 在下降段开始处, 水流紧贴虹吸管底部, 导致驼峰段顶部脱流。当 $t=14.5\text{ s}$ 时, 堰流与出水池水面相交, 水力驱气阶段结束。在水力挟气阶段, 如图 2(c) 所示, 水流不断翻过驼峰段形成堰流, 沿下降段上壁跌落, 于驼峰段顶部形成上气囊, 并于下降段底部脱流, 形成下气囊。堰流跌落冲击出水池中的水体, 使得下降段下端水流剧烈翻滚, 水气互相混合着流出虹吸管。在此过程中, 随着水流不断流动, 驼峰段压强降低, 上气囊中空气逐渐被水流挟带排出, 于 $t=39.0\text{ s}$ 时被排尽; 而下气囊也随下降段水气混合的水流的排出而逐渐减小, 于 $t=31.0\text{ s}$ 时排尽。 $t=39.0\text{ s}$ 时虹吸管内气体被全部带出, 形成满管流动, 虹吸形成过程完成。虹吸形成过程完成后, 虹吸管内的水气混合状态见图 2(h)。可见虹吸管内气囊的滞留时间是影响虹吸形成时间的主要因素, 而上气囊比下气囊更难排尽。

对设计流量下虹吸管内气体体积分数进行统计, 并用气体体积分数曲线段大致斜率表示该时段内的平均排气速率, 结果如图 3 所示。初始时刻虹吸管内气体体积分数约为 53.4%, 在水力驱气阶段前期, 虹吸管内气体排出速率较大, 且为一稳定值, 当水流翻越驼峰段时, 虹吸管排气速率加大, 当虹吸管内气体体积分数约为 7.3% 时, 虹吸形成过程由

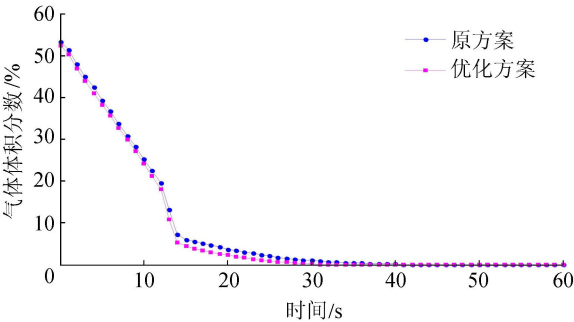


图3 $Q=Q_d$ 时虹吸管内气体体积分数变化

水力驱气阶段进入水力挟气阶段。进入水力挟气阶段后, 由于下降段内水流翻滚, 水流挟气能力较低, 气体排出速率骤降并逐渐减小。

2.2 不同流量下虹吸形成时间特性

分别对流量为 $0.7Q_d$ 、 Q_d 、 $1.3Q_d$ 时的虹吸管进行数值模拟, 图 4 为不同流量下虹吸形成过程中虹吸管内气体体积分数的变化情况, 表 2 为不同流量下虹吸管虹吸形成时间。在水力驱气阶段, 由于该阶段为简单的驱气过程, 虹吸管内气体因内部压强增大被排出, 排出速率略小于进流速率。由图 4 可看出在虹吸管内气体体积分数在 20.0% ~ 53.4% 区间内, $Q=1.3Q_d$ 的曲线段斜率最大, $Q=Q_d$ 的曲线段次之, $Q=0.7Q_d$ 的曲线段最小; 而从水流开始翻越驼峰段到接触下降段水面(虹吸管气体体积分数约为 7.0% ~ 20.0%) 的时间内, 各流量下虹吸管内气体体积分数曲线段斜率同样符合前述规律。而气体体积分数曲线斜率越大, 排气速率越大。可见整个水力驱气阶段虹吸管进流流量越大, 排气速率越大, 该阶段持续时间越短。

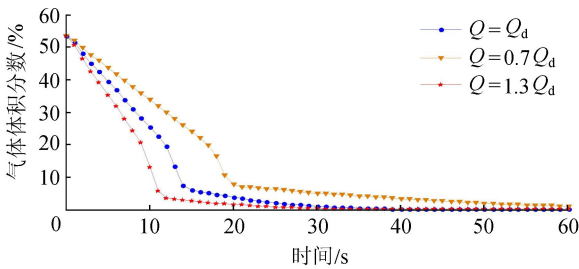


图4 不同流量下虹吸管内气体体积分数变化

表2 不同流量下虹吸管虹吸形成时间

流量	水力驱气阶段	水力挟气阶段	虹吸形成时间
$Q=0.7Q_d$	0 ~ 15.9 s	15.9 ~ 53.9 s	53.9 s
$Q=Q_d$	0 ~ 14.5 s	14.5 ~ 39.0 s	39.0 s
$Q=1.3Q_d$	0 ~ 12.7 s	12.7 ~ 29.1 s	29.1 s

图 5、图 6 分别为不同流量下水流翻越驼峰段时、水流刚接触下降段水面时、水力挟气阶段时虹吸管内水流的流速分布和水气混合状态。在 $Q=Q_d$

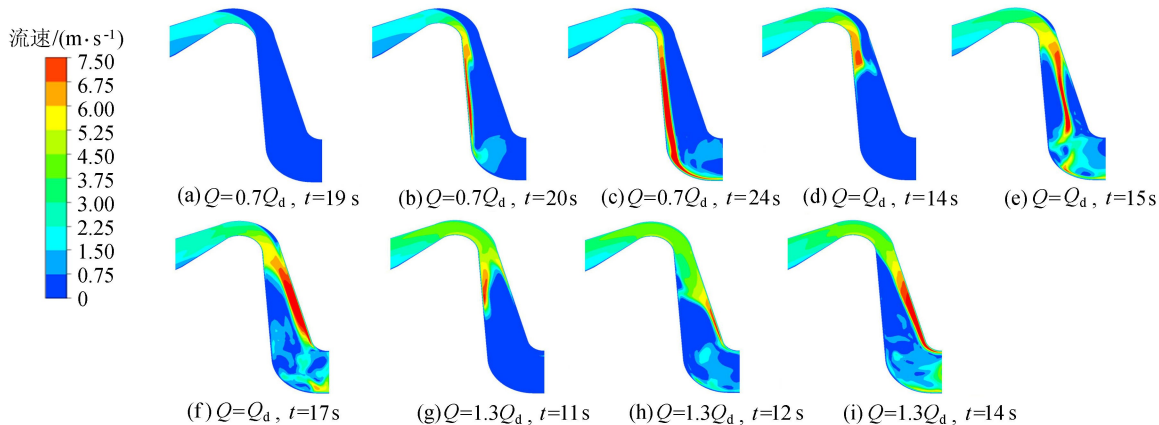


图5 不同流量下虹吸管各时段的流速分布

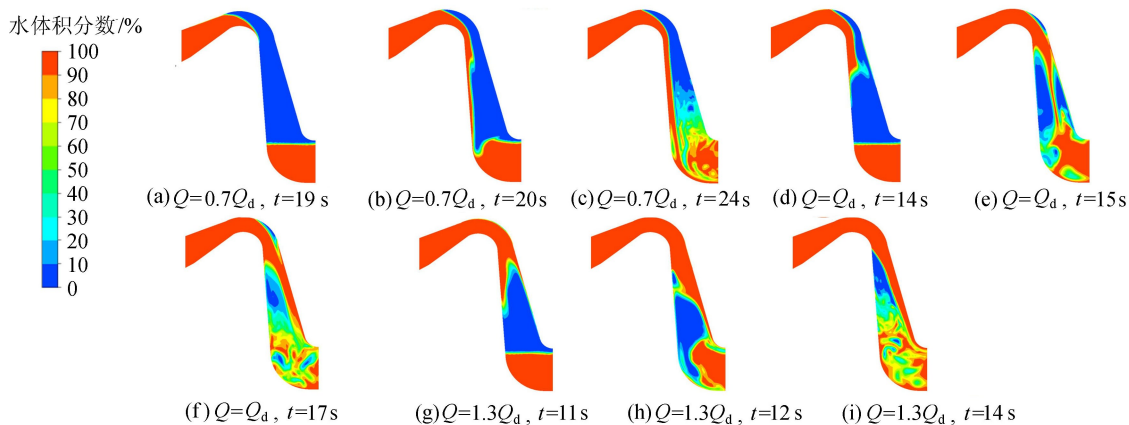


图6 不同流量下虹吸管各时段的水气混合状态

时,水流翻越驼峰段,驼峰段开始处水流流速为 $3.00 \sim 3.75 \text{ m/s}$,由于重力作用,导致主流偏向于驼峰段底部,驼峰段顶部形成脱流现象,而底部流速较大,见图 5(d)。当水流越过驼峰段后,由于底部流速较大,下降段倾角过大,导致水流形成堰流后沿下降段上壁跌落,从而形成上下气囊,见图 5(f)。由图 5(a)可知,当 $Q=0.7Q_d$ 时,水流翻越驼峰段,驼峰段开始处的流速为 $2.25 \sim 3.00 \text{ m/s}$,流速较小,故水流受重力影响较明显,主流集中且偏向于底层,上壁脱落点较 $Q=Q_d$ 时前移,并紧贴下降段下壁跌落,在虹吸管中仅形成上气囊,见图 5(c)。 $Q=1.3Q_d$ 时,驼峰段开始处水流流速为 $3.75 \sim 4.50 \text{ m/s}$,由于水流翻越驼峰段时总体流速较大,惯性导致主流偏向于驼峰顶部,顶部流速较大,在驼峰段处无脱落点,直接沿下降段上壁跌落,在虹吸管中仅形成下气囊。可见水流翻越驼峰段时的流速分布对于上下气囊的形成起决定作用。

在水力挟气阶段,由图 6(f)可知 $Q=Q_d$ 时上气囊体积较小,下气囊体积远大于上气囊,虹吸管内气体体积分数变化主要取决于下气囊排出气体的速率,而 $Q=1.3Q_d$ 时,仅存在下气囊,见图 6(i),气体体积分数变化由下气囊排气速率决定。对比

图 5(f)和图 5(i), $Q=Q_d$ 时虹吸管内水流与下气囊的水气交界面上水流流速为 $6.75 \sim 7.50 \text{ m/s}$ 的面积约占 90%,而 $Q=1.3Q_d$ 时约占 70%,故 $Q=Q_d$ 时,水流与下气囊的水气交界面上水流流速更大,下气囊的压强降低得更快,水流挟气能力更强,由图 4 亦可看出此阶段 $Q=Q_d$ 时的虹吸管气体体积分数下降更快。可见水力挟气阶段,水气交界面上的水流流速大小与排气速率成正比。

3 虹吸管改善措施对虹吸形成时间的影响

对于虹吸式出水管的优化,冯建刚^[16]结合工程实际,通过模型试验研究了虹吸形成过程的影响因素,并通过修改虹吸式出水管外部尺寸改善其水力特性,缩短虹吸形成时间;李彦军等^[17]利用数学建模开发了基于虹吸管设计参数的优化设计软件,通过调整虹吸管的型线以改善水流流态,减少水力损失;谭淋露等^[18]利用数值模拟方法对原方案外部尺寸进行调整,优化了其水力特性。但是鲜有人通过在虹吸式出水管内部增设改善措施以优化其水力特性,缩短其虹吸形成时间。而在实际工程中,虹吸式出水管的布置受场地约束较多,只调整外部轮廓有时无法满足其安全有效运行的要求,故本文采取的

移,下气囊体积明显减小。由此可见,优化方案中分流板的设置通过调节驼峰段水流流速分布,对上下气囊的产生均有一定的抑制作用。

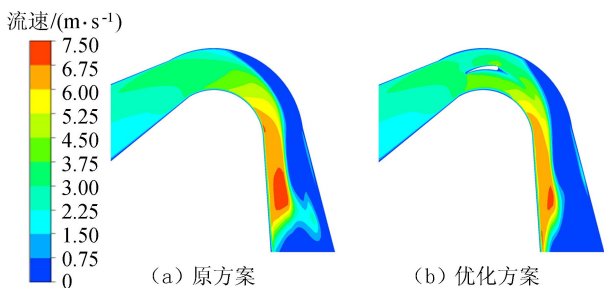
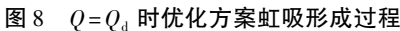
图 9 $t=14\text{ s}$ 流速分布

Figure 10 displays the velocity field distribution in the vertical section of the water tunnel for two different schemes. The color scale represents velocity in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, ranging from 0 (blue) to 7.50 (red). The flow is shown entering from the left and exiting to the right, with a sharp turn at the bottom. (a) 原方案 (Original scheme) shows a velocity field with a maximum value of 7.50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. (b) 优化方案 (Optimized scheme) shows a velocity field with a maximum value of 6.75 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. The velocity field is more uniform in the optimized scheme compared to the original scheme.

图 10 $t=16\text{ s}$ 流速分布

在水力挟气阶段,两者虹吸管内水流流速分布见图 11,在水流沿下降段跌落时的水气交界面上,原方案的水流流速约为 $1.50 \sim 2.25 \text{ m/s}$,优化方案约为 $3.00 \sim 3.75 \text{ m/s}$,故此处优化方案挟气能力较强。但由于原方案主流较为集中,水流跌落后与出水池水面翻滚流速大,翻滚时的水气交界面上原方案的流速约为 $1.50 \sim 2.25 \text{ m/s}$,优化方案约为 $0.75 \sim 1.50 \text{ m/s}$,故此处原方案的挟气能力较强。在水力挟气阶段两者排气速率近似相等,总体挟气能力相近,但由于优化方案并未形成上气囊,且下气囊体积较小,故优化方案水力挟气阶段持续时间较短。综上,将设计流量下原方案、优化方案虹吸形成过程各阶段时间汇总于表 3,可知增设分流板后,虹吸形成时间明显缩短,缩短约 12.5% 。



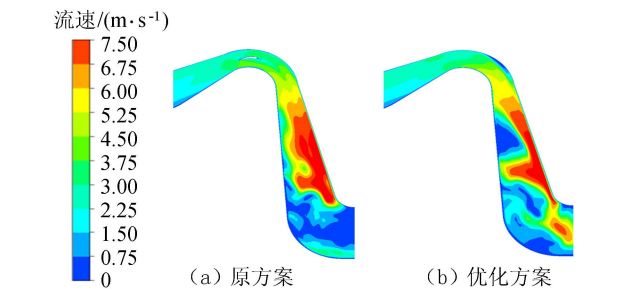


图 11 $t=20\text{ s}$ 流速分布

表 3 设计流量下虹吸形成时间

方案	水力驱气阶段	水力挟气阶段	虹吸形成时间
原方案	0 ~ 14.5 s	14.5 ~ 39.0 s	39.0 s
优化方案	0 ~ 14.5 s	14.5 ~ 34.0 s	34.0 s

计算两个方案的水力损失,原方案水力损失为 2.27 m,优化方案水力损失为 2.28 m,可知分流板的设置对于水力损失的影响极小,可忽略不计。

综上可知,泵站虹吸式出水管虹吸形成时间受驼峰顶部气囊的影响较大,气囊排出较慢,则虹吸形成时间较长,在虹吸管顶部增设分流板,可有效缩短虹吸管的虹吸形成时间。其作用机理为:通过调整虹吸管的内部几何结构,调节驼峰段水流流速分布,增大局部流速,以加快驼峰顶部气囊的排出,使得虹吸形成时间有效减少。对于类似形式的虹吸式出水管,当虹吸形成过程中由于过流量较小,驼峰顶部易产生滞留气团时,本文的研究成果亦有借鉴作用。

4 结 论

- a. 虹吸形成过程中,虹吸管内上下气囊的滞留时间是决定虹吸形成时间的主要因素。
- b. 虹吸管进流流量越大,水力驱气阶段的持续时间越短。水力挟气阶段时,水气交界面处的流速大小与排气速率成正比。水流翻越驼峰段时的流速分布决定了上下气囊的形成,在驼峰段内增设分流板能通过改善流速分布,有效抑制上下气囊的产生,缩短虹吸形成时间。
- c. 虹吸管内增设改善措施能有效减少虹吸形成时间,对于水力损失的影响极小,可忽略不计。

参考文献:

[1] 冯建刚,成斌,王晓升. 基于 π 定理的虹吸式出水管原型和模型虹吸形成时间的相似分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(4): 503-507. (FENG Jiangang, CHENG Bin, WANG Xiaosheng. Similarity analysis of siphon formation time of siphon pipes between the prototype and model based on the π theorem [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2011, 51(4): 503-507. (in Chinese))

[2] 刘竹溪,刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[3] 吴东彦,陆林广. 基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型的虹吸式出水通道三维紊流数值模拟[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2008, 6(2): 22-25. (GAO Dongyan, LU Linguang. Three-dimensional numerical simulation of flow in the siphon outlet passages based upon RNG $k-\varepsilon$ turbulent model [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2008, 6(2): 22-25. (in Chinese))

[4] 朱红耕,袁寿其,刘厚林. 大型泵站虹吸式出水通道三维紊流数值计算[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2005, 8(2): 74-78. (ZHU Honggeng, YUAN Shouqi, LIU Houlin. Numerical computation of the three-dimensional turbulent flow in siphon outlet conduit of large pumping stations [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2005, 8(2): 74-78. (in Chinese))

[5] 朱红耕,袁寿其,施卫东. 大型泵站虹吸式出水通道水力特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 71-76. (ZHU Honggeng, YUAN Shouqi, SHI Weidong. Study on the hydraulic characteristics of the siphon outlet conduit of large-sized pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(7): 71-76. (in Chinese))

[6] 朱红耕,袁寿其. 进口流场对虹吸式出水通道的性能影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 193-196. (ZHU Honggeng, YUAN Shouqi. Effect of imported flow field on performance of siphon water discharge [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 193-196. (in Chinese))

[7] 朱红耕. 非设计工况下虹吸式出水通道内流数值分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 140-144. (ZHU Honggeng. Numerical analysis of siphonic outlet flow in non-design conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 140-144. (in Chinese))

[8] 仲付维. 泵站虹吸式出水管驼峰真空值试验研究[J]. 水利水电科技进展, 1994, 14(2): 64-70. (ZHONG Fuwei. Testing analysis of vacuum degrees on humps of siphon-type water outflow pipe in pumping stations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1994, 14(2): 64-70. (in Chinese))

[9] 楼玉先. 梅坞水库虹吸管驼峰真空度控制[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2008, 20(1): 24-26, 33. (LOU Yuxian. Meiwu reservoir vacuum control of siphon tube [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2008, 20(1): 24-26, 33. (in Chinese))

[10] CHENG Li, LUO Can, LIU Chao. Numerical simulation of relationship between flow pattern and hydraulic performance of tubular pump [C]//Proceedings of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S. l.]: ASME, 2011: 793-799.

[11] WANG Fujun, LI Yaojun, CONG Guohui, et al. CFD simulation of 3D flow in large-bore axial-flow pump with half-elbow suction sump [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2006, 18(2): 243-247.

[12] 袁寿其, 刘厚林. 泵类流体机械研究进展与展望[J]. 排灌机械工程学报, 2007, 25(6): 46-51. (YUAN Shouqi, LIU Houlin. Research progress and prospecton fluid machinery-pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 46-51. (in Chinese))

[13] 周龙才, 刘士和, 丘传忻. 泵站正向进水前池流态的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2004, 22(1): 23-27. (ZHOU Longcai, LIU Shihe, QIU Chuanxi. Numerical simulation of fluid flow in forward inflow forebay of pumping station [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004, 22(1): 23-27. (in Chinese))

[14] 冯建刚. 城市排水泵站虹吸式出水管水力特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.

[15] 王晓升, 冯建刚. 泵站虹吸式出水管虹吸形成过程气液两相流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 78-83. (WANG Xiaosheng, FENG Jiangang. Numerical simulation of gas-liquid flow outlet pipe siphon siphon formed Pumping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 78-83. (in Chinese))

[16] 冯建刚. 大型城市取水泵站虹吸式出水管水力特性研究[J]. 给水排水, 2007, 33(11): 203-206. (FENG Jiangang. Research on hydraulic characteristics of siphon-type water outflow pipe in big size municipal water intake pumping station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(11): 203-206. (in Chinese))

[17] 李彦军, 颜红勤, 葛强. 泵站虹吸式出水渠道优化设计 [J]. 排灌机械, 2008, 26(4): 43-47. (LI Yanjun, YAN Hongqin, GE Qiang. Optimum design of siphon outlet conduit in pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2008, 26(4): 43-47. (in Chinese))

[18] 谭淋露, 冯建刚, 陈毓陵, 等. 泵站虹吸式出水管数值模拟及水力优化[J]. 中国农村水利水电, 2014, 31(3): 126-133. (TAN Linlu, FENG Jiangang, CHEN Yuling, et al. Numerical simulation and hydraulic optimization of siphon outlet pipe in pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, 31(3): 126-133. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-12-11 编辑: 骆超)

(上接第 80 页)

- d. 当周围存在对 GPS-RTK 信号形成干扰的建筑物或设施时, 多波束测深系统将产生随时间累积的系统误差。
- e. 由于大水深作用, 船只漂浮于水面, 多波束测深系统会在冲刷淘空区域顶部出现检测波不能到达引起的数据盲区。

参考文献:

[1] 陈云华, 吴世勇, 马光文. 中国水电发展形势与展望[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 1-4. (CHEN Yunhua, WU Shiyong, MA Guangwen. Trends and prospects of hydropower development in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 1-4. (in Chinese))

[2] 王英奎, 廖仁强, 江春波. 高拱坝水垫塘消能机理及水力学参数研究进展[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 40-43. (WANG Yingkui LIAO Renqiang, JIANG Chunbo. Research progress on energy dissipation mechanism and hydraulic characteristics of plunge pool in high arch dam [J]. Yangtze River, 2015, 46(8): 40-43. (in Chinese))

[3] LI Haisen, XU Chao, ZHOU Tian. High-resolution integrated detection of underwater topography and geomorphology based on multibeam interferometric echo sounder [J]. Advances in Hydrology and Hydraulic Engineering, 2012, 212/213: 345-350.

[4] 拜阳, 宋海斌, 关永贤, 等. 利用反射地震和多波束资料研究南海西北部麻坑的结构特征与成因[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2208-2222. (BAI Yang, SONG Haibin, GUAN Yongxian, et al. Structural characteristics and genesis of pockmarks in the northwest of the South China Sea derived from reflective seismic and multibeam data [J]. Chinese Journal Geophysics, 2014, 57(7): 2208-2222. (in Chinese))

[5] 关永贤, 杨胜雄, 宋海斌, 等. 南海西南部深水水道的多波束地形与多道反射地震研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4153-4161. (GUAN Yongxian, YANG Shengxiong, SONG Haibin, et al. Study of deep water channels in SW South China Sea based on multi-beam bathymetric and multi-channel reflection seismic data [J]. Chinese Journal Geophysics, 2016, 59(11): 4153-4161. (in Chinese))

[6] HAMMERSTAD E. Advances in multibeam echo sounder technology [C]//OCEANS, 93, Engineering in Harmony with Ocean, Proceedings. Victoria, BC, Canada: IEEE: 1482-1487.

[7] ROBERTS H H, SHEDD W, HUNT J. Dive site geology: DSV ALVIN (2006) and ROV JASON II (2007) dives to the middle-lower continental slope [J]. Deep-Sea Research Part II, 2010, 57(21/22/23): 1837-1858.

[8] ANDERSON J T. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes [J]. Infectious Diseases, 2007, 35(5): 351-352.

(收稿日期: 2017-05-24 编辑: 郑孝宇)