

虹吸式出水管虹吸形成过程的壁面压力及脉动特性

李志祥¹, 徐 辉², 冯建刚^{2,3}, 钱尚拓²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要:通过物理模型试验测量虹吸式出水管在虹吸形成过程中典型断面的压力过程线,采用邻域平均法提取脉动压力数据,采用统计特征和短时傅里叶变换信号处理方法分析时均和脉动压力特征。结果表明:管壁时均压力沿水流方向先减小后增大,驼峰段的上壁面时均压力随着流量增大逐渐大于下壁面;虹吸形成过程中,压力脉动呈正偏态分布,均方差沿水流方向不断降低;压力脉动主要由水泵旋转和水气运动引起,频率在0~30 Hz之间,主频与水泵转频相近;相比虹吸稳定流阶段,水力驱气阶段存在的气囊压缩和释放过程使得压力脉动频率及幅值上升,接近泵站系统自振频率,容易产生结构振动,需要通过设计和运行的优化减少该阶段的持续时间。

关键词:虹吸式出水管;虹吸形成过程;脉动压力;脉动频率;振幅

中图分类号:TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0043-07

Wall pressure and fluctuating characteristics of a siphon outlet pipe during siphoning formation process//LI Zhixiang¹, XU Hui², FENG Jiangang^{2,3}, QIAN Shangtu² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy & Civil Engineering, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: The pressure process line at typical sections of a siphon outlet was measured by physical experiment. Pressure pulsation of the siphoning formation process was obtained by the neighborhood average method, and the statistical characteristics and short-time Fourier transform signal processing method were conducted to systematically analyze the universal change law for time-averaged pressure and pressure pulsation. The results show that the time-averaged pressure on the wall, along the flow direction, first decreases and then increases. The time-averaged pressure on the upper wall of the hump segment changes with the flow rate and is gradually greater than that of the lower wall. The pressure pulsation in the process of siphon formation has a positive skew distribution, and the quadratic mean deviation keeps decreasing along the direction of the flow. The pressure pulsation in the process of siphon formation is composed of the rotation of the pump and the movement of water-air, which has a frequency between 0 and 30 Hz, with the dominant frequency close to the rotation frequency. Compared to the entrainment stage and siphoning flow stage, a significant increase in pressure frequency and amplitude occurs in the purging stage, which is close to the natural frequency of pumping station, leading to structural vibration. Design and operation should be optimized to reduce the duration time of the purging stage.

Key words: siphon outlet pipe; siphoning formation process; pulsating pressure; pulsating frequency; amplitude

泵站虹吸式出水管广泛应用于低扬程的立式、斜式泵站,它主要由上升段、驼峰段和下降段组成,具有停机断流方便、冲击水锤小等优势。水泵机组启动后,水体首先填充流道上升段,然后翻过驼峰段,在下降段形成溢流,管道内空气受水流挟带由下游出水池排出,最终形成满管稳定虹吸。从水泵启动到管内空气排尽的整个过程称为虹吸形成过程,

可分为水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流3个阶段^[1-2]。虹吸形成过程中,流态、管壁压力和水泵扬程均随着时间发生复杂变化,实测资料表明,该过程中管壁压力和扬程均显著大于虹吸稳定后的正常工作状态^[3-4]。水泵机组工作的加压方式为间隙加压,间隙加压和两相流湍流均会使虹吸管内产生很大的压力脉动^[5-7]。管道受到水流压力脉动的激发作用,

基金项目:国家自然科学基金(51779082,51009051)
作者简介:李志祥(1994—),男,博士研究生,主要从事工程水力学研究。E-mail:2513286620@qq.com
通信作者:冯建刚(1976—),男,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

引发振动和噪声,可能导致管道疲劳破坏,机组损坏等,严重威胁泵站运行与居民生活的安全。虹吸形成过程属于水泵作为动力源的复杂两相流动,系统研究虹吸式出水管虹吸形成过程的管壁压力和脉动特性对泵站工程的安全高效运行具有重要理论意义和实用价值。

国内外针对泵站虹吸式出水管的水力特性开展了大量研究。虹吸式出水管的流场观测表明,由于管道的复杂弯曲体型,管内易产生漩涡、贴壁流等不良流态^[8-11]。研究人员采用三维流道优化技术和整流措施改善虹吸管流态,减少水力损失,提升水力性能^[12-14]。针对虹吸形成过程中管道内复杂的水力瞬变流,现已开展丰富的研究,包括流场分析及其对机组性能的影响^[3,15-18]、虹吸形成过程各阶段的相似准则^[19-20]、虹吸形成时间和虹吸形成机理等^[14,21-24]。虹吸形成过程中,由于复杂水气相互作用和水泵叶轮转动影响,管壁将产生复杂的脉动压力,可能影响结构和机组的稳定和效率,目前相关研究有限。

本文采用物理模型试验方法测量了虹吸式出水管虹吸形成过程典型断面的管壁压力过程线。通过邻域平均法提取压力过程线的脉动压力,应用统计学及短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)信号处理等方法分析典型断面时均和脉动压力分布规律,揭示虹吸形成过程各阶段脉动压力特征。

1 模型设计与量测

以上海某正向进水,虹吸式出水的典型排水泵站为原型设计1:7正态物理模型,包括水泵进水池、模型泵机组、虹吸式出水管、出水池、回水系统^[23,25]。图1是虹吸式出水管试验装置照片。试验模型泵选用蜗壳型混流泵,设计扬程为8 m,流量为50 L/s,叶轮叶片数为4,转速为1 480 r/min。试验需求的流量通过安装在管路的蝶阀控制和电磁流量计测量,精度为±0.5%。出水池内设置挡水墙以控制出水池水位恒定,保持虹吸管出口淹没深度为0.1 m。

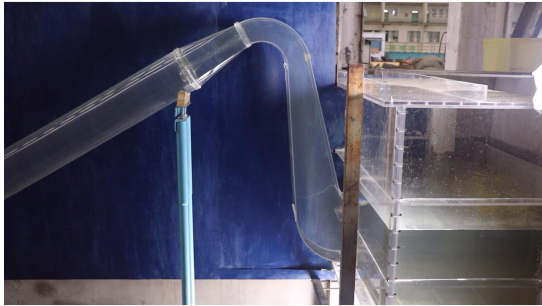


图1 虹吸式出水管试验装置

图2是虹吸管典型断面及测点布置示意图,虹

吸管详细设计参数见文献[1]。图2(a)是虹吸管沿程选取的5个典型断面,断面1位于上升段,断面2~4位于驼峰段起始、中间和末尾位置,断面5位于出口断面。以断面1为例,说明断面管壁压力测点设置情况。如图2(b)所示,沿圆周方向将管壁4等分,a位于断面上壁,b和d分别位于右侧和左侧,c位于下壁,采用脉动压力传感器测量各测点的压力数据。

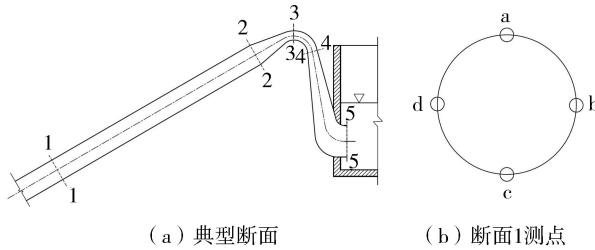


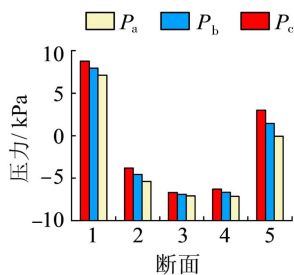
图2 典型断面及脉动压力测点布置示意图

2 时均压力分布规律

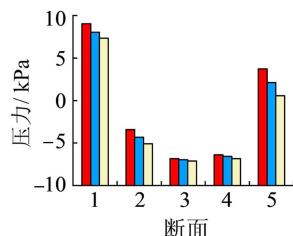
虹吸形成后,虹吸管内为纯水满管流动,整个流场各物理量不随时间发生显著变化,可认为是稳态流动。将虹吸稳定流阶段持续10 s的脉动压力均值作为时均压力,试验得到不同流量下($Q = 11.34 \sim 28.15 \text{ L/s}$)断面1~5的管壁时均压力分布,如图3所示。 P_a 和 P_c 分别表示上壁面测点a和下壁面测点c的时均压力。由于各断面均为轴对称,左右两侧壁面测点b和d所受压力几乎一致,取b和d测点压力的平均值 P_b 表示侧壁时均压力。

由图3可知,断面1、5的管壁各测点时均压力都为正压。断面2、3、4的时均压力均为负压,因为这些断面高程均位于出水池水位之上。断面1~5的均值压力沿程具有先下降后上升的变化规律,即水流流向驼峰压力逐渐减小,越过驼峰流向虹吸管出口压力恢复。断面1、2、5的管壁时均压力周向分布受流量变化影响较小,在各流量下均表现为下壁、侧壁和上壁依次减小的规律。断面1、2、5的上下壁面压差最大值依次为1 698.2 Pa、1 672.6 Pa和3 069.7 Pa。

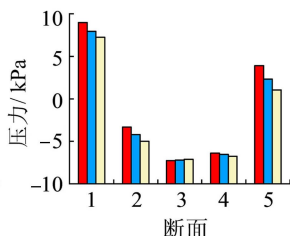
断面3和4位于虹吸管驼峰段,由于边界扭曲,流态复杂,管壁时均压力周向分布随流量变化而显著改变。随流量增大,断面3和4的上壁面时均压力先低于下壁面时均压力,然后逐渐高于下壁面时均压力,在此过程中,侧壁时均压力总是位于上下壁面时均压力之间。图4反映断面3和4上下壁面压差 $\Delta P = P_c - P_a$ 随流量 Q 的变化规律。断面3和4的 ΔP 均随流量增大线性减小, ΔP 的绝对值则随流量增大先减小后增大,表明管壁压力周向分布的不均匀程



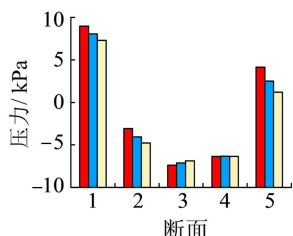
(a) $Q=11.34\text{ L/s}$



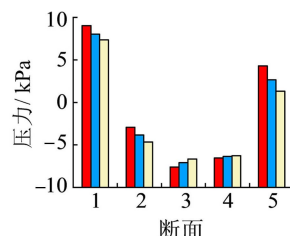
(b) $Q=15.12\text{ L/s}$



(c) $Q=18.90\text{ L/s}$



(d) $Q=22.68\text{ L/s}$



(e) $Q=28.15\text{ L/s}$

图3 不同流量下断面1~5管壁时均压力

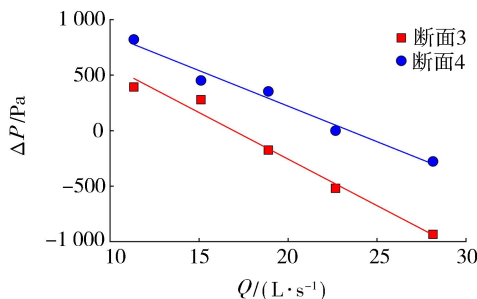


图4 断面3、4上下壁面时均压力差随流量变化规律

度随流量增大先减小后增大。大流量下,虹吸管内水流流速较大,经过驼峰段弯转产生较大离心力,上壁面受到更大的水流冲击压力,表现为该处时均压力随流量增大而增大,逐渐高于下壁面时均压力。

3 脉动压力特性

3.1 压力过程线

试验量测了虹吸管断面1~5管壁的压力过程线。以位于驼峰段的断面3为例,分析 $Q=22.68\text{ L/s}$ 时上壁、下壁和侧壁面的脉动压力,如图5所示。驼峰段上壁、侧壁和下壁面的压力均先上升再下降直至稳定。虹吸形成过程中,上壁、侧壁和下壁面的压力脉动趋势基本一致,最大振幅发生 $0\sim 4\text{ s}$ 。形成虹吸稳定流后,平均振幅均为 324 Pa 。下文中将进一步分析 $Q=22.68\text{ L/s}$ 时断面1~5的上壁面脉动

压力数据。

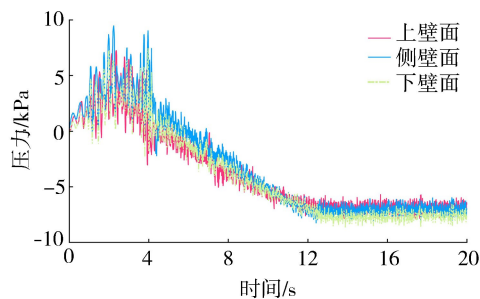


图5 断面3上壁、侧壁和下壁面的压力过程线 ($Q=22.68\text{ L/s}$)

由图6可知,压力脉动在水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流各阶段呈现出不同特征。试验观测表明, $0\sim 4\text{ s}$ 为水力驱气阶段, $4\sim 13\text{ s}$ 为水力挟气阶段, 13 s 之后为虹吸稳定流阶段。断面1~4的时均压力随时间先增大后降低,最终趋于稳定,断面5位于出口处,受到出水池静水压力影响,时均压力基本保持不变。各断面的脉动振幅在水力驱气阶段逐渐增大并达到最大值,在水力挟气阶段减小并趋于稳定。脉动振幅还与断面所处位置有关:断面1位于上升段,脉动振幅最大,整个虹吸形成过程的振幅均值为 1324.30 Pa ;断面5位于出口段,脉动振幅最小,整个虹吸形成过程的振幅均值为 374.56 Pa 。

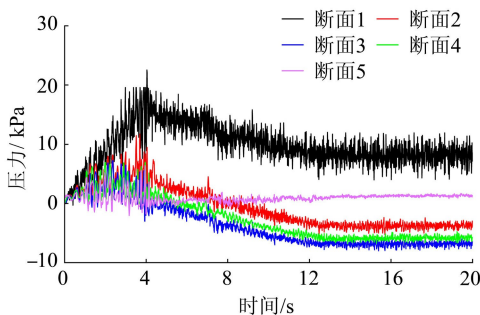


图6 断面1~5上壁面压力过程线 ($Q=22.68\text{ L/s}$)

3.2 压力脉动分解

脉动压力可由压力过程线减去该段过程线的时均压力值获得。虹吸形成过程中,壁面的时均和脉动压力在水力驱气、水力挟气阶段显著变化,而在虹吸稳定流阶段保持基本恒定。本文通过邻域平均法^[26]分解虹吸形成过程,得到各时刻的时均压力,简述如下:对于任意时刻 i ,取邻域 S ,范围为 $(i-S+1, i+S-1)$,则邻域 S 内含有 $2S-1$ 个实测压力数据,计算上述压力数据的平均值即为 i 时刻的时均压力 $\bar{P}_i$:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{2S-1} \sum_{j=i-S+1}^{i+S-1} P_j \quad (1)$$

由图6可得,虹吸形成过程的压力过程线存在较大起伏,如果计算选取的邻域范围过大会略去压力过程线的起伏变化,如果选取的邻域范围过小,其

时均平滑性难以保证。为此,通过对比不同的邻域范围,最终确定 $S=10$ 。

压力脉动均方差 σ_p 能反映压力脉动的幅值大小,它反映的实际是 n 个由邻域平均法提取的压力脉动绝对值的平均值,即脉动压力幅值的平均值。选取的 n 越大,计算的脉动数据就越多,计算时段就越长。选取 n 为 12、24、64、128 不同均方差计算范围,分析不同计算范围内压力脉动均方差的差异。由于试验采用的压力传感器采集频率为 128 Hz,因此 4 个 n 值对应的时间间隔分别为 0.09 s、0.19 s、0.5 s 和 1 s。以断面 1 的压力过程线为例,做上壁面的压力均方差过程线,如图 7 所示。如图 7 所示, n 越大过程线波动越小。水力驱气阶段压力脉动振幅很大,压力均方差逐渐升高,约在 4 s 时达到最大峰值。此后进入水力挟气阶段,压力均方差快速降低,逐渐趋于稳定。虹吸稳定流阶段, $n=128$ 的时候,压力脉动均方差基本不随时间变化。由此可见,压力脉动均方差在虹吸形成过程的 3 个阶段呈现不同的变化性质,下文将按照这 3 个阶段进行讨论。

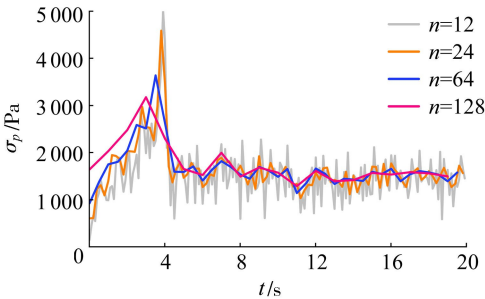


图 7 断面 1 压力均方差过程线

3.3 振幅统计特性

图 8 反映水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流阶段断面 1~5 上壁面的 σ_p 。 σ_p 在水力驱气阶段最大,在虹吸稳定流阶段最小。在水力挟气和虹吸稳定流阶段, σ_p 表现出随着水流方向逐渐减小的规律,而在水力驱气阶段规律不显著。 σ_p 在断面 1 最大,原因为断面 1 靠近水泵机组,受到旋转运动和入流不均匀性的影响。

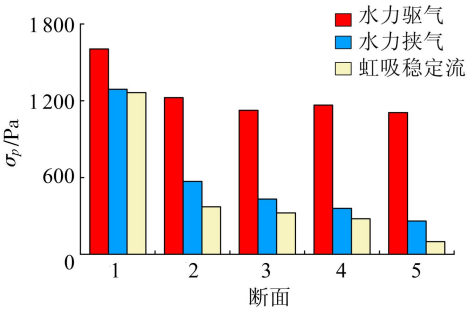


图 8 虹吸管上壁面 σ_p 沿程变化

压力脉动特性的偏态系数 C_s 表示脉动信号的不对称程度,峰态系数 C_k 表示脉动信号的陡峭程度,两者的计算公式参见文献[27]。

图 9 为不同阶段断面 1~5 壁面脉动振幅的偏态系数 C_s 和峰态系数 C_k 。

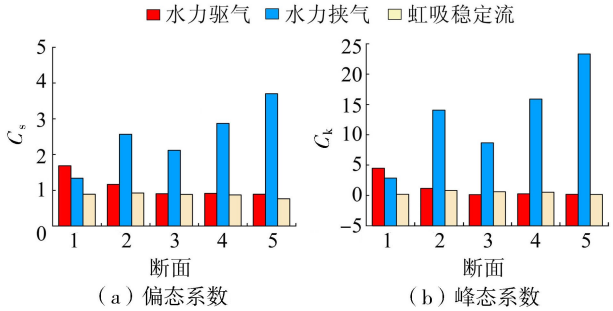


图 9 虹吸形成过程各阶段断面 1~5 的偏态系数和峰态系数

C_s 、 C_k 的沿程变化规律基本一致,在水力驱气和虹吸稳定流阶段沿程逐渐减小,在水力挟气阶段沿程逐渐增加并在位于驼峰段的断面 3 降低。由图 9(a)可知, C_s 在各阶段均大于 0,表明虹吸形成过程中脉动幅值的概率分布为正偏态分布。在水力挟气阶段,断面 1 之后,由于受到水泵出流影响, C_s 显著大于其他阶段,压力脉动偏斜程度增加。在断面 1, C_s 随时间持续减小,而在断面 2~5, C_s 随着时间先增大后减小。由图 9(b)可知,在水力驱气和虹吸稳定流阶段,脉动压力振幅沿程逐渐收敛至 $C_k=0$,表明该段时间的振幅向标准正态峰度逼近,在水力挟气阶段则表现为越来越陡峭。与 C_s 类似,在断面 1, C_k 随时间持续减小,而在断面 2~5, C_k 随着时间先增大后减小。由此可得,在虹吸形成过程中,虹吸管内的复杂的气液两相运动会引起脉动压力的偏态系数和峰态系数显著变化,与虹吸形成稳定流后的脉动振幅分布存在很大差异。虹吸稳定流的偏态系数约为 1,是正偏态分布,其峰态系数值约为 0,为标准峰度。

3.4 频率特性

对于存在周期变化,平稳的压力脉动,应用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)能确定复杂被测信号的组成频率[28]。虹吸形成过程中时均压力及压力脉动随时间不断发生剧烈变化,为复杂瞬态变化。不同于 FFT,STFT 利用窗函数可以实现任意时刻的频谱局域化,构建反映频率的幅值随时间变化的 STFT 频谱图[29-30]。因此,为分析虹吸形成过程脉动压力的频率特性,对虹吸管断面 1~5 上壁测点压力脉动数据进行 STFT,如图 10 所示。其中,STFT 使用的窗函数为 Hamming 窗,窗口采样数为 128。

总体而言,所有断面均以低频信号(30 Hz 以下)为主导,该压力脉动信号按频域分布特点可分为两类:一是贯穿整个虹吸形成过程的压力脉动主

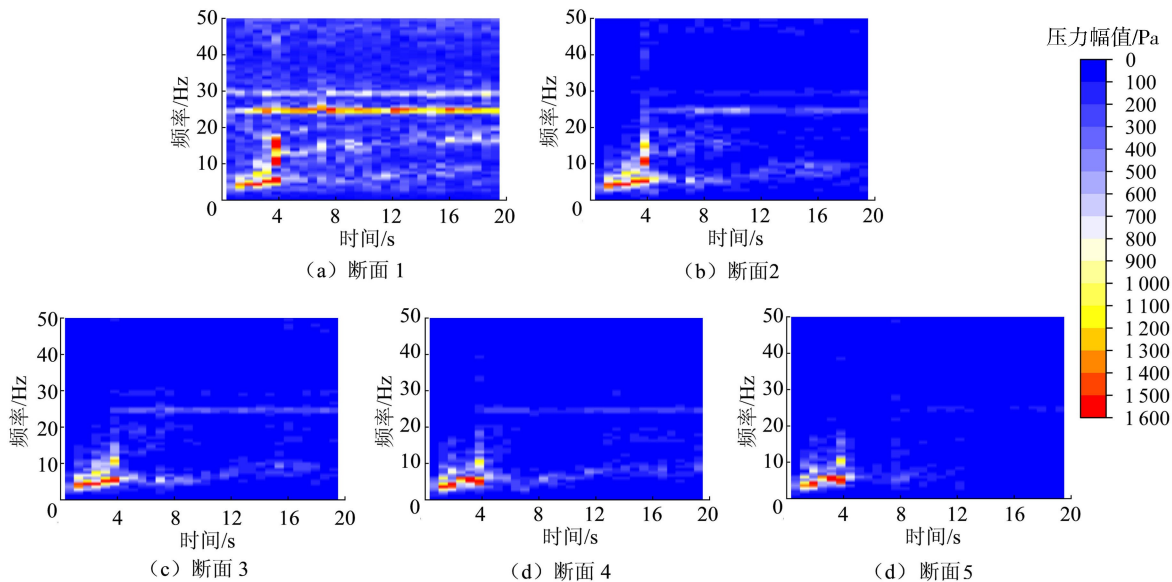


图 10 虹吸形成过程各断面测点 STFT 频谱

频(24.71 Hz),由水泵旋转引起,为模型泵的一倍转频;二是发生在水力驱气阶段,受水气运动影响,压力脉动频率在 20 Hz 以下。

压力幅值大小在虹吸形成过程中不发生显著变化的转频频率,是由动静干涉作用产生。高速旋转的水泵叶轮与静止的压水室周期性地做相对运动,叶轮作为激励源基频对压水室等无叶区的压力产生激励作用,引起水泵出口的流场发生同样的周期变化。表现为整个虹吸形成过程中,虹吸管各断面的压力脉动主频为转频频率,且幅值不随时间发生变化。对比不同断面的转频压力脉动幅值可知,沿水流方向幅值不断减小,在断面 5 幅值降低至 92 Pa。结合图 8 反映的振幅均方差规律,所有断面中,断面 1 最靠近模型泵机组,具有最大的幅值。

在水力驱气阶段,水气运动剧烈产生约 500 Pa 的振幅压力信号,而且幅值和频率均随时间逐渐升高,在 4 s 时压力脉动幅值达到最大,由水力驱气过程产生的频率也同时达到峰值,这部分的压力信号

会在后续时间里迅速降低。图 11(a) ~ (e) 为水力驱气阶段,图 11(f) 为水力挟气阶段。图 11(a)(b) 下降段自由液面变化显著,图 11(a) 液位向下凹陷,这是由于管内气囊受到涌入虹吸管水流压缩,压力上升,挤压下降段液面。到 $t=0.70\text{ s}$,受到压缩的气囊得到释放,管内压力恢复,自由液面上升,如图 11(b) 所示。水力驱气阶段,管内气囊受到水流作用一直重复进行上述压缩、释放过程(如图 11(c)(d)),并伴随压力快速变化,由此产生的压力脉动幅值和频率不断增加。对比图 11(e) ~ (f) 可知,水力挟气阶段流态显著转变,下降段及出水池内出现明显白色水气掺混现象,表明虹吸管排气形式由气囊直接释放转变为水气混掺排出。这一阶段由水气运动产生的压力脉动幅值和频率发生断崖式下降,说明驱气阶段的气囊压缩、释放过程是幅值和频率增长的根本原因。综上所述,虹吸过程中压力脉动的主要来源是水泵旋转和水气运动,其中水泵作用频率为水泵一倍转频,水气运动作用频率随水力驱

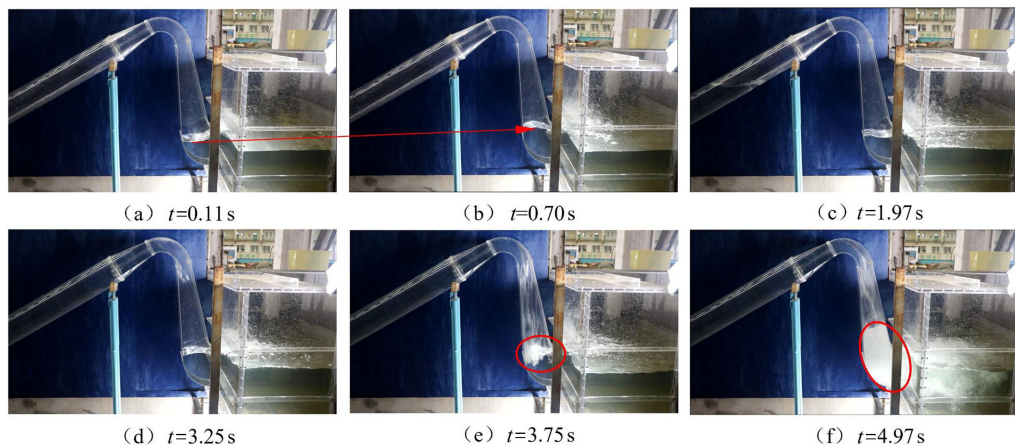


图 11 虹吸式出水管水气运动流态

气时间不断增长。

泵站系统的自振频率是系统本身的固有特性,由泵站系统的结构、弹性和材料决定。如果管内水流引起的压力脉动频率和泵站系统的自振频率一致将导致共振,可能造成结构破坏。研究表明^[31],泵站系统自振频率为中低频率,振动频率大于 4 Hz。GB 50265—2010《泵站设计规范》提出,由水流脉动等引起的振动频率与系统自振频率错开 20% 以上可认为结构安全稳定,不易发生共振现象。由图 10 可知,水力驱气阶段会产生 5 Hz 左右的脉动频率,与泵站系统的自振频率相近,如果该阶段时间持续时间过长,将危害泵站的安全和效率。

4 讨 论

模型试验取得的研究成果在映射到原型泵站虹吸式出水管水力特性时,必须遵循某种相似规律才能保证原型和模型内速度场及压力场相似。虹吸形成过程是水泵驱动的复杂水气两相流动,受重力、惯性力、黏滞力、表面张力、压力等的综合作用,表征这些作用力关系的无量纲数为欧拉数 Eu 、斯特劳哈数 St 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、韦伯数 We 。要满足原型、模型的内部流动相似,2 个流动系统的若干个无量纲数(也称相似准数)要对应相等,然而,模型试验几乎不可能同时满足上述几个准数相等。针对试验量测的压力脉动及其紧密相关的虹吸形成时间相似分析的相关成果^[19-20,32-33]较少,尤其是压力脉动的相似规律,由于压力脉动来源复杂,至今没有一个令众人满意的结论。参考现有类似的研究成果^[19-20,32-33],定性地给出已被学者认可的相似规律。

a. 压力脉动。原模型压力脉动幅值变化趋势基本一致,原模型压力脉动的主频基本一致。

b. 虹吸形成时间。模型在 λ^{-1} 大气压力的减压环境下运行,原模型相似规律则满足以下换算公式:

$$T_r = \lambda^{0.5} T_m \quad (2)$$

式中: λ 为原模型比尺; T_r 为原型虹吸形成时间; T_m 为模型虹吸形成时间。

5 结 论

a. 当形成虹吸稳定流后,虹吸式出水管壁面时均压力沿程先减小后增大。在上升段和出口段,时均压力的周向分布规律受流量影响有限,下壁面时均压力始终大于上壁面。驼峰段受到水流方向改变和断面形状变化影响,随着流量增大,上壁面时均压力逐渐大于下壁面。侧壁面时均压力始终位于上、下壁面之间。

b. 受水气相互作用和能量转化影响,水力驱气

阶段脉动压力均方差最大。顺水流方向,各断面的脉动压力均方差逐渐降低。不考虑受模型泵影响最大的断面 1,虹吸形成过程脉动压力的偏态系数和峰态系数随着时间先增大后减小。虹吸稳定流的偏态系数约为 1,是正偏态分布,其峰态系数值约为 0,为标准峰度。

c. 虹吸形成过程中,壁面压力脉动主要由水泵旋转和水气运动引起,频率集中在 0 ~ 30 Hz 之间,主频与水泵转频相近,幅值沿流程从 1 232 Pa 逐渐降至 92 Pa。水力驱气阶段,气囊的压缩和释放过程使得压力脉动频率及幅值上升,且与泵站系统自振频率相近,在工程设计和运行中需要采取措施减少水力驱气阶段的持续时间。

参考文献:

[1] 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.

[2] MINATO A, NAKAJIMA N, NAGAHARA T. Simulation des écoulements diphasiques dans les stations de pompage[J]. La Houille Blanche, 2006(1): 59-64.

[3] 刘梅清,杨文容,徐叶琴. 带虹吸式出水流道轴流泵站起动水力过渡过程研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003(1): 1-4. (LIU Meiqing, YANG Wenrong, XU Yeqin. Research on start-up hydraulic transient of axial-flow pumping stations with siphon outflow conduit[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003(1): 1-4. (in Chinese))

[4] ZHOU L, WANG H, KARNEY B, et al. Dynamic behavior of entrapped air pocket in a water filling pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(8): 04018045.

[5] 王亚楠. 高扬程泵站压力管道振动特性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2015.

[6] 何兆洋,刘海潇,何利民,等. 管道内气液两相流流激力研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 129-136. (HE Zhaoyang, LIU Haixiao, HE Limin, et al. Research progress of fluctuating force caused by internal gas-liquid flow[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 129-136. (in Chinese))

[7] GONÇALVES R C, TEIXEIRA P R F, DIDIER E, et al. Numerical analysis of the influence of air compressibility effects on an oscillating water column wave energy converter chamber[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 1183-1193.

[8] 杨帆,刘超,孙丹丹,等. 轴流泵装置虹吸式出水流道内流机理数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 60-65. (YANG Fan, LIU Chao, SUN Dandan, et al. Numerical investigation of internal flow mechanisms of siphon outlet passage in pumping system[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 60-65. (in Chinese))
- [9] 朱红耕,袁寿其,刘厚林,等.大型泵站虹吸式出水渠道三维紊流数值计算[J].扬州大学学报(自然科学版), 2005(2): 74-78. (ZHU Honggeng, YUAN Shouqi, LIU Houlin, et al. 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(2): 74-78. (in Chinese))
- [10] 陆林广,杲东彦,祝婕.大型泵站虹吸式出水渠道优化水力设计[J].农业机械学报, 2005(4): 60-63. (LU Linguang, GAO Dongyan, ZHU Jie. Optimum hydraulic design of siphon outlet in large pumping stations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005(4): 60-63. (in Chinese))
- [11] LI Y, WANG J, CHEN X. Can a toilet promote virus transmission? From a fluid dynamics perspective [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(6): 065107.
- [12] 仇宝云,黄季艳,袁寿其,等.轴流泵出水渠道水力损失试验研究[J].机械工程学报, 2006(5): 39-44. (QIU Baoyun, HUANG Jiyang, YUAN Shouqi, et al. Test investigation on hydraulic losses in discharge passage of axial-flow pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006(5): 39-44. (in Chinese))
- [13] 陈松山,何钟宁,周正富,等.泵站出水渠道标准化设计与模型水力损失试验[J].水泵技术, 2007(2): 42-45. (CHEN Songshan, HE Zhongning, ZHOU Zhengfu, et al. Standardized design of outlet channel of pumping station and model test of hydraulic loss [J]. Pump Technology, 2007(2): 42-45. (in Chinese))
- [14] 冯建刚,温陈碧,王晓升.泵站虹吸式出水管虹吸形成时间特性分析及其改善措施[J].水利水电科技进展, 2018, 38(3): 88-94. (FENG Jiangang, WEN Chenbi, WANG Xiaosheng. Analysis on siphon formation time characteristics and improvements for siphon outlet conduit in a pump station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 88-94. (in Chinese))
- [15] 于永海,徐辉,冯建刚,等.城市排污泵站虹吸式出水管水力瞬变过程现场试验分析[J].给水排水, 2005, 9(31): 86-87. (YU Yonghai, XU Hui, FENG Jiangang, et al. Test analysis of transient process of siphon outlet pipe in urban sewage pumping station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2005, 9(31): 86-87. (in Chinese))
- [16] 周大庆,刘跃飞.基于VOF模型的轴流泵机组启动过程数值模拟[J].排灌机械工程学报, 2016, 34(4): 307-312. (ZHOU Daqing, LIU Yuefei. Numerical simulation of axial pump unit startup process using VOF model [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(4): 307-312. (in Chinese))
- [17] SEDLÁ M, PROCHÁZKA P, KOMÁREK M, et al. Experimental research and numerical analysis of flow phenomena in discharge object with siphon [J]. Water, 2020, 12(12): 23.
- [18] ZHENG J, GUO J, WANG J, et al. Calculation of the flow velocity of a siphon [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(1): 017105.
- [19] 李百齐.虹吸管出水断流装置的流体力学相似分析[C]//第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会议文集.北京:海洋出版社, 2003: 955-963.
- [20] 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 and Technology), 2011, 51(4): 503-507. (in Chinese))
- [21] 王晓升,冯建刚,陈红勋,等.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, CHEN Hongxun, et al. Numerical simulation for two-phase flow of siphon outlet in pumping station [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 78-83. (in Chinese))
- [22] YU K, CHYENG Y, ZHANG X. Hydraulic characteristics of a siphon-shaped overflow tower in a long water conveyance system: CFD simulation and analysis [J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(4): 564-575.
- [23] 陈曜辉,徐辉,冯建刚,等.断面形状对虹吸式出水渠道水力特性的影响[J].水利水电科技进展, 2022, 42(1): 47-52. (CHEN Yaohui, XU Hui, FENG Jiangang, et al. Effect of section forms on hydraulic characteristics of a siphon outlet passage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 47-52. (in Chinese))
- [24] ALEXANDER J M, LEE P J, DAVIDSON M, et al. Experimental investigation of the interaction of fluid transients with an in-line air pocket [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 146(3): 04019067.
- [25] 李志祥,冯建刚,钱尚拓,等.排水泵站整流底坎参数优化[J].农业工程学报, 2021, 37(3): 56-63. (LI Zhixiang, FENG Jiangang, QIAN Shangtuo, et al. Optimization of rectification bottom sill parameters in drainage pumping stations [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 56-63. (in Chinese))
- [26] DAVIES E R. Formulation of an accurate discrete theory of median shifts [J]. Signal Processing, 2003, 83(3): 531-544.

(下转第 80 页)

main stream of Daduhe River under background of cascade hydropower development [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 (10): 133-145. (in Chinese)

[32] 刘猛,张逸譔,刘园,等.雅砻江锦屏大河湾鱼类多样性及群落结构的年际变化[J].淡水渔业,2022,52(2):22-33. (LIU Meng, ZHANG Yixuan, LIU Yuan, et al. Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River [J]. Freshwater Fisheries, 2022, 52 (2): 22-33. (in Chinese))

[33] 邓嘉俊,王小东,同琳钿,等.雅砻江中游支流力丘河鱼类资源现状[J].四川动物,2022,41(4):444-453. (DENG Jiajun, WANG Xiaodong, TONG Lintian, et al. Fish diversity and spatial pattern in the Liqiu River, a tributary of the middle Yalong River [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2022, 41 (4): 444-453. (in Chinese))

[34] 陈帮富,王东胜,张迪,等.流域水电开发水生生态及鱼类保护实践:以大渡河流域为例[J].水利水电技术(中英文),2022,53(增刊1):347-357. (CHEN Bangfu, WANG Dongsheng, ZHANG Di, et al. Conservation of aquatic ecosystems and fish species during hydropower development in the river basin: case study for the Dadu River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (Sup1): 347-357. (in Chinese))

[35] 曹娜,毛战坡.大渡河干流水电开发中鱼类保护对策及建议[J].水利水电技术,2017,48(1):116-121. (CAO Na, MAO Zhanpo. Countermeasures and suggestions on fish protection during hydropower development of mainstream of Daduhe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (1): 116-121. (in Chinese))

[36] MULLIGAN M, VAN SOESBERGEN A, SÁENZ L. GOODD, a global dataset of more than 38, 000 georeferenced dams [J]. Scientific Data, 2020, 7 (1): 31.

[37] 何斌,颜涛,黄颖颖,等.大渡河上游鱼类资源现状[J].淡水渔业,2021,51(1):38-45. (HE Bin, YAN Tao, HUANG Yingying, et al. Analysis of fish resources status in the upper reaches of the Dadu River [J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51 (1): 38-45. (in Chinese))

[38] 水博.应该如何表述我国的水电开发程度? [J]. 中国三峡,2009(3):5-10. (SHUI Bo. How should we express the degree of hydropower development in our country? [J]. China Three Gorges, 2009 (3): 5-10. (in Chinese))

[39] 纪国强,张先平,黄建和.水能资源健康可开发利用率初探 [J]. 人民长江, 2007, 38 (11): 113-114. (JI Guoqiang, ZHANG Xianping, HUANG Jianhe. Preliminary study on healthy developable ratio of water energy [J]. Yangtze River, 2007, 38 (11): 113-114. (in Chinese))

[40] 仇欣,肖晋宇,吴佳玮,等.全球水能资源评估模型与方法研究 [J]. 水力发电, 2021, 47 (5): 106-111. (QIU Xin, XIAO Jinyu, WU Jiawei, et al. Research on evaluation model and methodology of global hydropower resources [J]. Water Power, 2021, 47 (5): 106-111. (in Chinese))

[41] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27 (2): 93-115.

[42] YUN Xiaobo, TANG Qiuhong, WANG Jie, et al. Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125472.

(收稿日期:2022-03-20 编辑:俞云利)

+++++

(上接第 49 页)

[27] 朱洪涛,高学平,刘殷竹.进/出水口出流扩散脉动流速规律试验研究[J].水力发电学报,2022,41(7):129-139. (ZHU Hongtao, GAO Xueping, LIU Yinzhu. Experimental study of velocity fluctuations in inlet/outlet under outflow diffusion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (7): 129-139. (in Chinese))

[28] 叶长亮,王福军,李怀成,等.双进口两级双吸离心泵过渡流道压力脉动特性研究[J].农业机械学报,2017,48(2):126-134. (YE Changliang, WANG Fujun, LI Huaicheng, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation and vibration characteristics of a double suction centrifugal pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (2): 126-134. (in Chinese))

[29] 陈会向.贯流式水轮机甩负荷过渡过程水力特性数值模拟与试验研究[D].南京:河海大学,2019.

[30] SALEHI S, NILSSON H, LILLBERG E, et al. An in-depth numerical analysis of transient flow field in a Francis turbine during shutdown [J]. Renewable Energy, 2021, 179: 2322-2347.

[31] 李航,沈振中,马保泰,等.某泵站厂房振源识别与振动成因[J].南水北调与水利科技,2020,18(5):151-156. (LI Hang, SHEN Zhenzhong, MA Baotai, et al. Identification of vibration source and causes of vibration in a pumping station building [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18 (5): 151-156. (in Chinese))

[32] 徐用良,覃大清,赵越,等.混流式水轮机尾水管压力脉动换算初探 [J]. 水力发电学报, 2016, 35 (1): 87-94. (XU Yongliang, QIN Daqing, ZHAO Yue, et al. Exploratory analysis on pressure fluctuation conversion in Francis turbine draft tubes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (1): 87-94. (in Chinese))

[33] 唐拥军.混流式水轮机原模型压力脉动相似分析[J].大电机技术,2015(4):47-51. (TANG Yongjun. Similarity analysis of water pressure pulsation of francis turbine between prototype and model [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2015 (4): 47-51. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-25 编辑:刘晓艳)