

# 水锤泵空气罐气体热力学过程的系统辨识

李甲振<sup>1</sup>, 杨开林<sup>1</sup>, 郭永鑫<sup>1</sup>, 郭新蕾<sup>1</sup>, 施春蓉<sup>2</sup>, 张国鹏<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;  
2. 河北工程大学, 河北 邯郸 056021)

**摘要:** 通过对一种自主原创的新型水锤泵的模型实验, 研究了空气罐的热力学过程及液位特性对水锤泵性能的影响, 提出了分析空气罐气体热力学过程的系统辨识方法, 并通过对实测数据的系统辨识, 得到了影响气体热力学过程的关键参数—多变指数  $k$  的变化规律。研究表明: 空气罐气体热力学过程的多变指数介于等温过程 ( $k=1.0$ ) 与绝热过程 ( $k=1.4$ ) 之间, 一般小于 1.2, 并且随着扬程的增加而减小。输水阀关闭过程中, 空气罐内的水向泵体回流, 使得扬水量减小, 因此, 改善输水阀的启闭特性, 减小回流量, 可提升水锤泵的性能。

**关键词:** 水锤泵; 模型实验; 空气罐; 系统辨识; 输水阀; 多变指数; 回流

**中图分类号:** TK12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0298-04

## System identification of thermodynamic process for the air chamber of hydraulic ram pump

LI Jia zhen<sup>1</sup>, YANG Kai lin<sup>1</sup>, GUO Yong xin<sup>1</sup>, GUO Xin lei<sup>1</sup>, SHI Chun rong<sup>2</sup>, ZHANG Guo peng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

**Abstract:** Based on the experiments conducted on the independently innovative hydraulic ram pump, the impacts of certain key factors, such as thermodynamic process and water level fluctuation of the air chamber, on the hydraulic ram pump were studied. The system identification method of the thermodynamic process for the air chamber was proposed. With the system identification of the measured results, the variation of polytropic exponent  $k$  was analyzed. The results showed that the polytropic exponent  $k$  of the thermodynamic process is between 1.0, indicating the isothermal process, and 1.4, indicating the adiabatic process, and is usually less than 1.2, which decreases with the increasing of the delivery head. When the delivery valve is closed, water in the air chamber can flow back into the pump body to lower the delivery flow. Through the improvement of the open close characteristics of the delivery valve, the backflow can be reduced and the hydraulic performance of the hydraulic ram pump can be promoted.

**Key words:** hydraulic ram pump; model experiment; air chamber; system identification; delivery valve; polytropic exponent; backflow

水锤泵是一种清洁环保的自动泵水机械。利用水锤原理, 可将大部分水的低水头位能转换为小部分水的高水头位能, 实现泵水目的<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着能源及环境问题的突显, 水锤泵的研制越来越受到人们的重视, Warwick 大学通过长达 12 年的研究, 制造了 S1、S2、P90 等型号的水锤泵<sup>[3]</sup>; Guinea 大学提出了水锤泵设计的经验公式<sup>[4-5]</sup>; Moates<sup>[6]</sup>、Mohammed<sup>[7]</sup> 等人利用水锤泵为农田泵送灌溉用水, 解决了实际生产问题。国内的一些专家, 如钟建立<sup>[8-9]</sup>、杨开林等<sup>[10]</sup>, 也对水锤泵进行过实验研究, 设计的新型水锤泵扬水量较国外产品有较大提升。

空气罐是水锤泵重要的蓄水储能部件, 其体积的确定是水锤泵设计研发的关键问题之一。该问题受气体热力学过程多变指数的影响。对于同一系统而言, 多变指数取值的差异, 会使流体瞬变压力产生近 20% 的差别<sup>[11-12]</sup>。目前, 水锤泵空气罐的多变指数一般假定为 1.2<sup>[3-13]</sup>, 但其取值缺少理论依据。为此, 可以通过测量系统运行过程中的气体压力及体积的变化, 建立数学模型, 并利用系统参数辨识的最小二乘法确定多变指数的最优估计。

系统辨识技术是 20 世纪 60 年代从现代系统理论发展起来的, 目前已经在水利水电工程中获得应用。Becker<sup>[14]</sup>、

收稿日期: 2014-11-04 修回日期: 2015-02-11 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1541.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109230); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室人才培养课题(水实验室运行 1404)

作者简介: 李甲振(1989-), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事水力控制方面研究。E-mail: neji1989@126.com

通讯作者: 杨开林(1955-), 男, 四川西充人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水力控制及河冰工程等方面的研究。E-mail: ykclwhr@sohu.com

董文军<sup>[15]</sup> 等对河道糙率的参数辨识问题进行研究, 杨开林<sup>[16]</sup> 提出了闸门动态特性辨识的数学模型, 李超顺<sup>[17]</sup> 建立了水轮机调节系统的 T-S 模糊模型并辨识了相应的参数。但是, 目前尚无关于空气罐多变指数辨识的方法及模型。

本文对研制的新型水锤泵进行实验, 提出了分析水锤泵空气罐气体热力学过程的系统辨识方法, 研究空气罐的动态特性, 为水锤泵的结构及性能优化提供理论基础。

### 1 水锤泵原理

水锤泵系统由上池、动力水管、下池、水锤泵、扬水管和高位水池组成, 其中水锤泵一般由泄水阀、输水阀、空气罐、空气阀、泵体和支架组成(图 1)。上池与下池的水位差(泄水阀淹没情况下)为作用水头  $H$ , 高位水池与上池的水位差为静扬程  $h$ , 扬送至高位水池的水量为扬水量  $q$ , 由上池进入下池的水量为泄水量  $Q$ 。

泄水阀在水流推力大于自身重力时, 迅速关闭, 使得系统发生水锤作用; 当作用于阀瓣上的水压力小于重力或其他外力时, 阀门向下运动, 重新打开。输水阀在发生水锤作用后, 其阀瓣向上运动使阀门打开, 水由泵体进入空气罐, 罐内气体受压, 一部分水直接通过扬水管进入高位水池, 其余部分水暂时存储在罐内; 输水阀在泵体压力低于空气罐压力时关闭, 防止罐内的水回流至泵体。借助泄水阀和输水阀的周期性交替启闭, 水锤泵可将水泵送至更高位置。

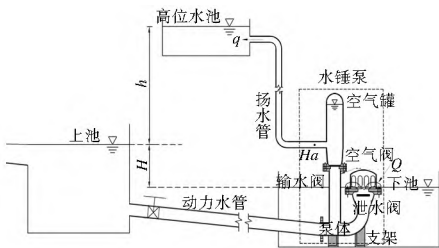


图 1 水锤泵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hydraulic ram pump

对高位水池与空气罐出口列能量方程<sup>[18]</sup>

$$h = H_a - (\lambda \frac{L}{D} + \sum \zeta) \frac{(q/1000)^2}{2gA_d^5} \quad (1)$$

式中:  $H_a$  为水锤泵扬程, 即以上池水面为基准的空气罐出口的水头(m);  $\lambda$  为扬水管的沿程阻力系数;  $L$ 、 $D$  分别为扬水管的长度和直径(m);  $\zeta$  为局部阻力系数;  $q$  为扬水量(L/s);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  $A_d$  为扬水管的截面积(m<sup>2</sup>)。

可见, 扬程  $H_a$  随扬水管阻力系数的增加而增加, 因此在有限的实验空间内, 可通过增加扬水管的局部阻力系数来模拟水锤泵的高扬程特性。

### 2 空气罐热力学过程的系统辨识

空气罐的热力学过程服从可逆多变关系<sup>[19]</sup>

$$p V^k = C = p_0 V_0^k \quad (2)$$

式中:  $p$  为气体的绝对压力(Pa), 等于表压力加上大气压力;  $V$  为气体体积(m<sup>3</sup>);  $k$  为多变指数;  $C$  为常数;  $p_0$  为某一状态的气体压力(Pa);  $V_0$  为  $p_0$  所对应的气体体积(m<sup>3</sup>)。对于完善气体, 等温过程的  $k$  取值为 1.0, 绝热过程的取值为 1.4。

对式(2)取自然对数得

$$\ln(p V^k) = \ln C = \ln(p_0 V_0^k)$$

整理得

$$\ln \frac{p}{p_0} + k \ln \frac{V}{V_0} = 0 \quad (3)$$

实验过程中, 空气罐的气体绝对压力  $p$  由压力传感器的监测数据获得, 气体体积  $V$  可利用空气罐内的液位数据推导求得。因此, 对于任意时刻  $t$ , 气体压力  $p$  与体积  $V$  均为已知量, 即

$$\ln \frac{p(t)}{p_0} + k \ln \frac{V(t)}{V_0} = 0 \quad (4)$$

式(4)的离散矩阵形式为

$$A + k \cdot B = 0 \quad (5)$$

式中:  $A = [\ln \frac{p(t_1)}{p_0}, \ln \frac{p(t_2)}{p_0}, \dots, \ln \frac{p(t_n)}{p_0}]^T$ ,  $B = [\ln \frac{V(t_1)}{V_0}, \ln \frac{V(t_2)}{V_0}, \dots, \ln \frac{V(t_n)}{V_0}]^T$ ,  $n$  为采样次数。

由式(5)知, 需要辨识的系统参数为  $k$ , 而实际的采样次数  $n$  远大于需要辨识的参数个数。因此, 可采用最小二乘法求解辨识参数。

### 3 试验装置与实验方法

模型实验在中国水利水电科学研究院水力学所实验大厅进行, 水锤泵选用自主原创的新型水锤泵<sup>[10]</sup>, 其作用水头  $H = 2.7 \sim 2.8$  m, 实验平台及部分实验设备见图 2。铁制水箱为系统提供恒水头的微水能资源, 其规格为长 × 宽 × 高 = 4.0 m × 2.5 m × 6.0 m。动力水管采用镀锌管, 长度为 13 m。泵池收集水锤泵的泄水, 同时可淹没水锤泵以减小噪音, 规格为长 × 宽 × 高 = 2.4 m × 1.0 m × 0.7 m。扬送的水量通过扬水管由水箱上侧汇入水箱。测试时, 由漏斗收集扬水, 导回地面进行测量。

扬水管路采用干管 → 并联三条支管 → 干管 → 水箱的布置形式, 其中, 三条支管上均安装有控制球阀, 以便切换扬水管路。两侧支管线路上, 分别安装有压差控制阀, 其压力调节元件为弹性系数为 48 N/mm 的控制弹簧。调节弹簧的压缩量可设置阀门的开启压力, 只有在它的进口压力超过预设临界值时, 阀门才开启容许水流通过; 当阀门进口压力小于预设临界值时, 阀门保持完全关闭。借助压差控制阀, 可控制空气罐出口的水头, 在有限的实验空间内, 模拟水锤泵不同的运行工况, 系统测试其性能。图 2 中, 两个控制阀的扬程调节范围为 5~70 m 和 60~120 m。其中, 空气罐的压力采用压力传感器进行测量, 量程为 0~1.6 MPa(160 m), 精度为 ±0.25%; 液位通过磁致伸缩式液位计测量, 量程为 0~500 mm, 精度为 ±0.05%。电测数据的采样间隔为 20 ms, 采样时间为 180 s, 采样次数 9 000 次。

空气罐的结构及液位计布置见图 3, 气体体积  $V(t)$  的计算公式为

$$V(t) = \frac{\pi D_c^2 - d^2}{4} (H_0 - H'(t)) + V_1 \quad (6)$$

式中:  $D_c$  为空气罐内径, 0.15 m;  $d$  为液位计滑杆的直径, 0.01 m;  $H_0$  为浮球位于顶盖下边缘位置处的液位计读数, 0.42 m;  $H'(t)$  为水锤泵运行过程中  $t$  时刻的液位计读数(m);  $V_1$  为顶盖部分的体积,  $4.58 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>。其中, 液位计

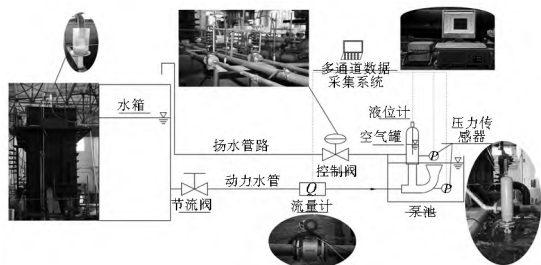


图 2 实验平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental platform

读数的零点为下侧挡块位置。

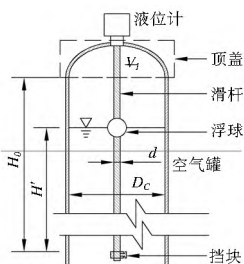


图 3 空气罐及液位计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the air chamber and liquid level meter

## 4 实验结果与分析

### 4.1 热力学参数辨识

典型扬程下, 0~ 60 s 内, 空气罐的绝对压力与液位见图 4。

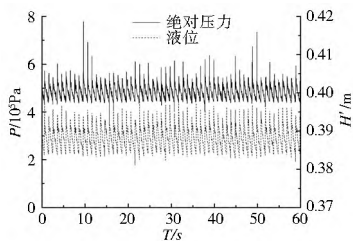


图 4 空气罐压力与液位 ( $h = 37 \text{ m}$ )

Fig. 4 Pressure and liquid level ( $h = 37 \text{ m}$ ) in the air chamber

当扬程大于 40 m 时, 空气罐液位波动小于 10 mm, 而液位计精度为  $\pm 0.25 \text{ mm}$ , 仪器测量的相对误差大于 5%。因此, 本文仅以扬程 40 m 以下的工况进行分析, 结果见图 5。可以看出, 多变指数介于等温过程  $k = 1.0$  与绝热过程  $k = 1.4$  之间, 均小于 1.2。随着扬程的增加, 液位波动的幅度变小, 速率下降, 且水锤泵的运行周期变长(图 7), 相较于低扬程的工况而言, 高扬程工况的空气罐气体的变化过程较慢, 因此, 多变指数较小。根据实验结果, 多变指数的拟合公式为

$$k = 1.2068 - 0.003h \quad (7)$$

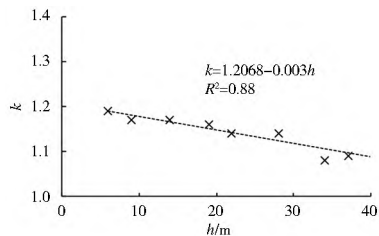


图 5 多变指数辨识结果

Fig. 5 Identification results of the polytropic exponent  $k$

当  $h = 37 \text{ m}$  时, 参数  $k$  的辨识结果为 1.09。根据该数

值, 计算不同时刻的  $pV^k$  (图 6), 结果基本在 260~ 270 之间, 说明辨识结果可靠。

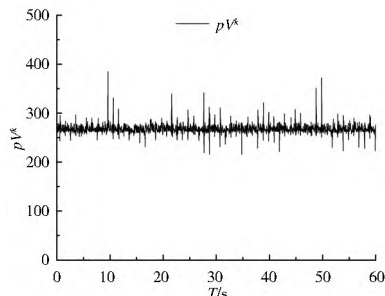


图 6  $pV^k$  的计算结果 ( $h = 37 \text{ m}$ )

Fig. 6 Calculated results of  $pV^k$  ( $h = 37 \text{ m}$ )

### 4.2 空气罐液位特性

图 7 为扬程  $h$  分别为 14 m、37 m、64 m 时, 空气罐的液位特性。在输水阀打开后, 液位迅速上升, 该时间段记为  $T_p$ ; 输水阀关闭后, 空气压能逐渐转变为水流动能, 罐内液位缓慢下降, 直到下一个工作循环, 该时间段记为  $T_a$ 。三种工况下, 液位波动的幅度分别为 3.0 cm、1.3 cm 和 0.4 cm。随着扬程的增加, 输水阀打开所需的水锤压力增大, 流速的减小值增加, 因而, 水进入空气罐的速度降低, 扬水量减小, 表现为空气罐液位的振幅减小。

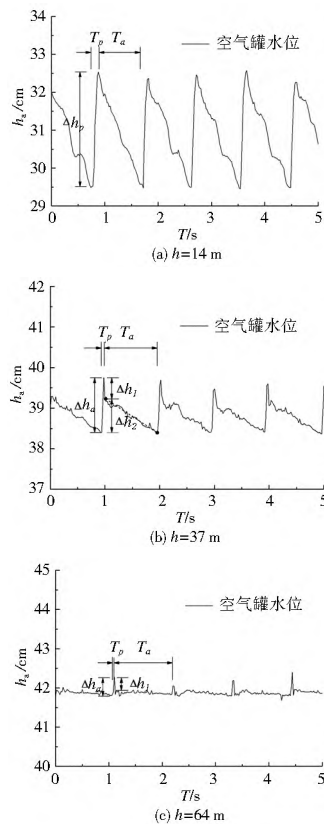


图 7 不同扬程的液位特性

Fig. 7 Liquid level characteristics of different delivery heads

理论上, 输水阀关闭后, 空气罐的液位应缓慢下降。但观察图 7(b) 和图 7(c) 后发现, 罐内液位迅速增加至峰值后, 液位会迅速下降  $\Delta h_1$ , 之后液位缓慢下降。显然, 这与水锤泵的理想工作状态不符, 主要是由于在输水阀关闭过程中空气罐内的水向泵体回流引起的。

输水阀的作用之一是防止水流由空气罐回流至泵体,使得空气的压能只能转化为水流的动能,输送到高位水池。但由于输水阀是机械式阀门,其启闭不可能是瞬间完成的,特别是关闭过程中,不可避免地会产生由空气罐向泵体的回流现象,使得扬水量减小。当扬程相对较低时,扬水量较大,罐内液位的振幅  $\Delta h_a$  较大,因此,回水所产生的影响相对较小;扬程较高时,由于扬水量较小,回水量所占比重较大,对水锤泵效率和扬水量的影响较大。如图 7 所示,高扬程的回水影响更明显。

因此,要增加水锤泵的扬水量,需要改善输水阀的启闭特性,使其迅速关闭,减小关闭过程中由空气罐向泵体的回流量。

## 5 结论

(1) 空气罐气体热力学过程的多变指数介于等温过程  $k=1.0$  与绝热过程  $k=1.4$  之间,一般小于 1.2,并且随着扬程的增加而减小。

(2) 空气罐液位迅速增加至峰值后,会迅速下降一定的幅度,这是由于输水阀关闭过程中空气罐的水回流至泵体而引起的。高扬程时,由于扬水量较小,回流的影响显著,使得水锤泵的扬水量减小。因此,提升水锤泵的性能需改善输水阀的启闭特性,实现速开速关,以减小回流量。

### 参考文献(References):

- [1] Mills A. The hydraulic ram (or impulse) pump[J]. Physics Education, 2014, 49(2): 211-214.
- [2] Sheikh S, Handa C C, Ninawe A P. Design methodology for hydraulic ram pump (hydram) [J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2013, 2(4): 170-175.
- [3] Filipan V, Virag Z, Bergant A. Mathematical modelling of a hydraulic ram pump system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 3: 137-149.
- [4] Young B W. Design of hydraulic ram pump systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 1995, 209(4): 313-322.
- [5] Young B W. Simplified analysis and design of the hydraulic ram pump[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 1996, 210(4): 295-303.
- [6] Moates T. Hydraulic ram pump[J]. Country side and Small Stock Journal, 2004, 88(4): 32-35.
- [7] Mohammed S N. Design and construction of a hydraulic ram pump[J]. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2007, 6(11): 59-70.
- [8] 钟建立, 蒋成球. 水锤泵安装系统优化调整的试验研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 91-94. (ZHONG Jian li, JIANG Cheng qiu. Optimum adjustment of installation system of hydraulic ram[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1998, 14(1): 91-94. (in Chinese))
- [9] 钟建立, 蒋成球. 水锤泵进水系统的试验与分析[J]. 农业机械学报, 1999, 30(1): 46-48. (ZHONG Jian li, JIANG Cheng qiu. Test and analysis on the inlet system of hydraulic ram[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1999, 30(1): 46-48. (in Chinese))
- [10] YANG Kai lin, LI Jia zhen, GU O Yong xin, et al. Design and hydraulic performance of a novel hydram. 11th International Conference on Hydroinformatics [C]. IIC 2014, New York City, USA.
- [11] Lee T S. A numerical method for the computation of the effects of an air vessel on the pressure surges in pumping systems with air entrainment[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 28: 703-718.
- [12] Lee T S. Effects of air entrainment on the ability of air vessels in the pressure surge suppressions[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122: 499-504.
- [13] Najm H N, Azoury P H, Piasecki M. Hydraulic ram analysis: a new look at an old problem[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 1999, 213(2): 127-141.
- [14] Becker L, Yeh W W-G. Identification of parameters in unsteady open channel flows[J]. Water Resources Research, 1972, 8(4): 956-965.
- [15] 董文军, 杨则燊. 一维圣维南方程的反问题研究与计算方法[J]. 水利学报, 2002(9): 61-65. (DONG Wen jun, YANG Ze shen. Calculation method for inverse problem of 1-D St. Venant equations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 61-65. (in Chinese))
- [16] 杨开林, 汪易森. 调水工程闸门特性的动态系统辨识[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1289-1294. (YANG Kai lin, WANG Yi sen. Dynamic system identification of gate characteristics for water diversion projects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1289-1294. (in Chinese))
- [17] 李超顺, 周建中, 安学利, 等. 基于 T-S 模糊模型的水轮机调节系统辨识[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(1): 108-111. (LI Chao shun, ZHOU Jian zhong, AN Xue li, et al. Identification of hydro turbine governing system based on T-S fuzzy model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(1): 108-111. (in Chinese))
- [18] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (WU Chi gong. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.)
- [19] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (YANG Kai lin. Hydraulic transients and regulate in power and pumping station[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2000. (in Chinese))