

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230779

高扬程输水系统泵后阀门关闭规律研究

占桂泉, 石向荣

(浙江九州治水科技股份有限公司, 浙江 衢州 324000)

摘要: 对于扬程较高的输水系统, 水泵抽水断电后产生的停泵水锤通常大于泵后阀门直接关闭产生的直接水锤。基于茹科夫斯基公式及水泵抽水断电的泵后降压规律, 研究了泵后阀门关闭规律对输水管道沿线压力的影响, 得到了水泵断电后泵后阀门最佳关闭时间的理论值, 即 $T_g = T_d$, 并结合实际输水工程, 采用数值模拟方法对该理论值进行了验证。结果表明, 对于高扬程输水工程, 水泵抽水断电后, 泵后阀门采用提出的理论值可使停泵水锤对输水系统产生的危害最小。

关键词: 高扬程; 输水工程; 阀门关闭规律; 水锤

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0200-04

1 引言

长距离输水工程可有效解决水资源时空分布不均的问题, 实现水资源的再次分配^[1]。对于含有泵站的高扬程输水系统, 当水泵因抽水断电而突然停机时, 水泵机组转速迅速降低导致流量急剧下降, 从而产生较大停泵水锤^[1-2]。由于停泵水锤波的影响, 输水管道初始压力较小的位置极有可能发生液柱分离现象, 被分离的液柱再度弥合时, 会导致输水系统发生爆管等安全事故^[3-4]。因此, 为保证水泵机组及输水管道安全稳定运行, 通常需在输水系统中制定合理的操作方案。对于含有加压泵站的输水工程, 一般需在水泵后设置事故阀门。当水泵抽水突然掉电后, 为了防止水泵倒转转速过大或时间过长, 通常需关闭泵后事故阀门。根据阀门关闭速率的不同, 阀门分为缓闭阀和速闭阀^[5]。一般阀门关闭越快, 水泵倒转转速越容易满足要求, 但阀门关闭时造成的水锤压力波动也越大, 不利于输水管道安全。根据关闭方式的不同, 阀门关闭分为一阶段关闭、两阶段关闭和多阶段关闭。目前, 对阀门关闭规律的研究也主要集中在阀门关闭方式上^[6-8], 但不同类型的输水工程阀门的最优关闭规律可能有所差异。鉴于此, 针对扬程较高的输水系统, 本文基于泵后降压规律及茹科夫斯基公式, 研究了泵后阀门关闭规律对输水管道沿线压力的影响, 得到了水泵断电

后泵后阀门最佳关闭规律的理论值, 该理论值可有效降低停泵水锤对输水系统的危害。

2 泵后阀门关闭规律理论分析

当水泵抽水因突然断电而停机时, 水泵后输水管道沿线压力的降压值由水泵机组特性、管道摩阻、末端出水池反射共同决定。其中末端出水池反射对输水管道的防护范围受泵后降压快慢的影响, 而泵后降压的快慢又与水泵机组特性密切相关。实际工程中由于水泵机组惯性的存在, 水泵掉电后泵后压力的下降为非瞬时的, 其降压存在一个先快后慢的过程。当水泵出口无防护措施且泵后阀门不动作时, 泵后压力随时间的变化趋势见图 1。图 1 中, T_d 为从水泵失电算起泵后压力下降 ΔH 所经历的时间; ΔH_s 为水泵掉电首相内泵后压力最大降压值, 即停泵水锤值; T_s 为水泵掉电首相内泵后压力下降到最低值所经历的时间。

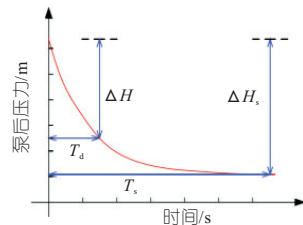


图 1 水泵抽水掉电泵后压力随时间变化过程
Fig. 1 Variations of pressure behind pump when a pump trip occurred

收稿日期: 2023-05-15, 修回日期: 2023-08-02

作者简介: 占桂泉(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程设计技术, E-mail: 6266618@qq.com

水泵掉电后,下游出水池及输水管道中的水会向泵前倒流。为了防止水泵倒转转速过大,保护水泵安全,通常需关闭泵后阀门。因此,对于泵站出口不设置防护措施的输水系统,其泵后压降及泵后阀门的关闭规律直接影响泵后输水管道沿线压力的大小。含泵站的输水系统常见的布置示意图见图 2。泵前设有进水池,泵后设有事故阀

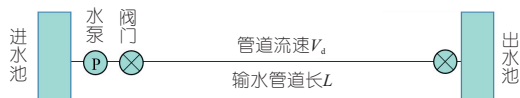


图 2 含泵站的输水系统平面布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water supply system with a pumping station

门。对于布置在上游的阀门,如果阀门的关闭时间 $T_g < 2L/a$ (一个相长),则阀后将产生直接水锤。直接水锤的大小可由茹科夫斯基公式求得:

$$\Delta H = -a(V - V_0)/g \quad (1)$$

式中, a 为输水管道中的水锤波速, m/s ; V 为阀门动作结束时刻阀门处流体的速度,若阀门全关则 $V = 0 \text{ m/s}$; V_0 为阀门动作前管道中流体初始速度, m/s 。

由上述分析可知,在水泵机组突然抽水断电且泵后不设置水锤防护措施时,输水系统沿线压力的降低值受到水泵机组特性及泵后阀门关闭规律的共同影响。对于事故停泵产生的停泵水锤大于泵后阀门关闭产生的直接水锤的高扬程输水工程,如果泵后阀门能在 T_d 时间内关闭,则输水管道沿线实际最大降压值 ΔH_p 应等于泵后阀门关闭产生的直接水锤值,即 $\Delta H_p = \Delta H < \Delta H_s$,此情况下泵后阀门快速关闭有利于输水管道安全,即阀门关闭时间 $T_g \leq T_d$ 。此外由于水泵掉电后泵后压力的下降为非瞬时的,当阀门关闭时间 $T_g < T_d$ 时,由于阀门关闭时间过快,此时泵后阀门关闭产生的压降速度大于水泵掉电的压降速度。泵后最大降压值虽然较 $T_g > T_d$ 有所减小,但此时会使出水池反射向前保护的距離变小,同样不利于输水系统安全。综上所述,对于高扬程泵站,即当 $\Delta H_s > \Delta H$ 时阀门的最佳理论关闭时间为:

$$T_g = T_d \quad (2)$$

3 算例验证

3.1 工程概况

某高扬程输水工程管道布置及设计工况下管道的沿线压力水头线见图 3。该长距离输水管道总长约 75.0 km,输水泵站共安装 4 台设计扬程

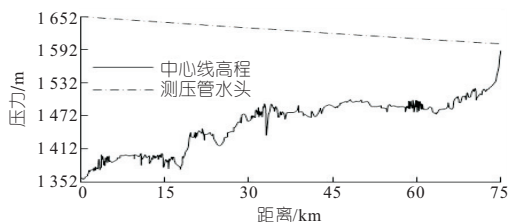


图 3 高扬程输水系统管中心线高程及压力水头线
Fig. 3 Elevation and piezometric head line of pipeline

为 300.0 m、设计流量为 0.55 m^3/s 的卧式离心水泵,其中 3 台工作 1 台备用。水泵的额定转速为 1 480.0 r/min ,电机的额定功率为 2 800.0 kW。输水系统进水池设计水位 1 365.5 m,经过长约 75.0 km 的 DN1400 的球墨铸铁管输水至下游出水池,出水池设计运行水位 1 602.5 m,水锤波速约 1 000 m/s 。

3.2 泵后阀门最佳理论关闭时间确定

当水泵抽水突然掉电且泵后阀门不动作时,泵后压力变化过程见图 4,输水管道沿线压力包络线见图 5(实际工程中,当压力降至 -10 m 时,管道中的水体已汽化,图 5 中低于 -10 m 的压力仅代表负压的严重程度)。输水管道总长 75 km,一个相长约 150 s。由图 4 可知,当水泵抽水断电且泵后阀门拒动时,一个相长内泵后压力由 296.6 m 降至 101.7 m,泵后最大压降值 $\Delta H = 194.9 \text{ m}$ 。由图 5 可知,该降压波向泵后传播使桩号 28+482 处的输水管道开始出现负压,管道沿线最小压力为 -64.4 m ,最大压力为 295.6 m。该工程主管道初始流速为 0.974 m/s ,如果忽略水泵的影响,泵后阀门在一个相长内关闭,由茹科夫斯基直接水锤计算公式(式(1))得阀

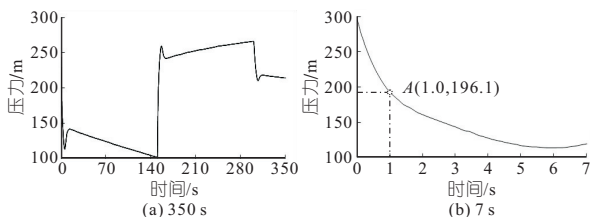


图 4 水泵无防护掉电泵后压力变化过程
Fig. 4 Pressure change processes behind pump when power failure

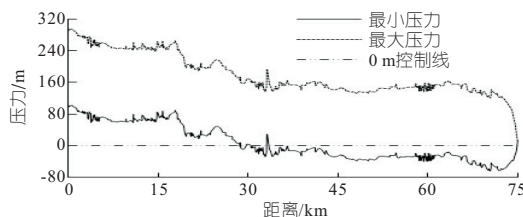


图 5 水泵抽水断电管道沿线压力包络线
Fig. 5 Pressure envelope curves along pipeline when power failure

后管道的降压值为 $\Delta H = -(1\ 000/9.81) \times (0 - 0.974) = 99.3\text{ m} < \Delta H_s = 194.9\text{ m}$ 。由泵后阀门关闭规律理论分析可知,泵后阀门应在泵后压力降至 $296.6 - 99.3\text{ m} = 197.3\text{ m}$ 前关闭。由图 4 可知,在水泵掉电的 1 s 内泵后压力由 296.6 m 降至 196.1 m,因此近似取 $T_d = 1\text{ s}$ 。

3.3 最佳关闭时间验证

为了探究泵后阀门的关闭规律对输水管线压力的影响及验证理论分析结果的正确性,针对实际关闭时间 $T_g \geq T_d$ 、 $T_g \leq T_d$ 两种不同情况进行讨论。对于 $T_g \leq T_d$ 的情况设计 3 种方案,即水泵掉电后泵后阀门分别采用 0.4、0.7、1.0 s 一段直线关闭规律关闭,3 种方案分别记为方案 1、2、3。对于 $T_g \geq T_d$ 的情况除了方案 3 外,还设计以下方案,即水泵掉电后泵后阀门采用 5.0、10.0、15.0 s 及 $\infty\text{ s}$ (即不关阀)一段直线关闭规律关闭,分别记为方案 4、5、6、7。不同方案下泵后压力变化过程及输水系统沿线压力包络线见图 6、7,方案 7 的计算结果见图 4、5。7 种操作方案下输水系统沿线压力极值统计结果见表 1。

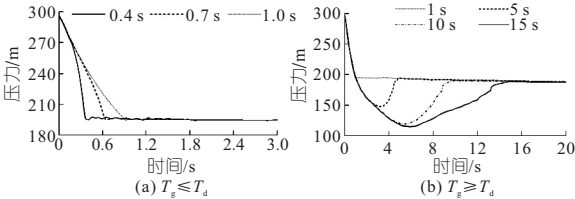


图 6 不同阀门关闭规律下泵后压力随时间变化过程
Fig. 6 Pressure change processes behind pump under different closing law

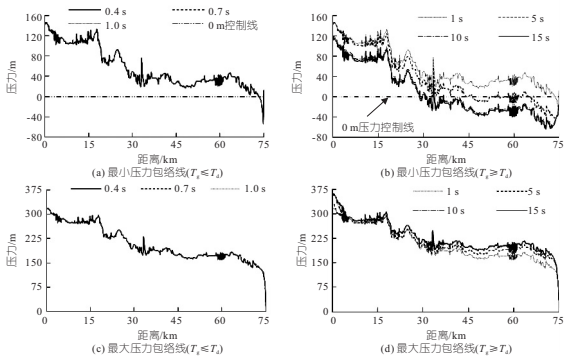


图 7 不同关闭规律下输水管道沿线最小、最大压力包络线
Fig. 7 Minimum and maximum pressure envelope curves along pipeline under different closing law

表 1 阀门不同操作方案下计算结果

Tab. 1 Numerical results under different valve closing law

方案	阀门关闭时间/s	泵后瞬时降压/m	最小压力/m	最大压力/m	管道负压段的长度/km	开始出现负压的桩号
1	0.4	101.6	-53.8	320.0	0.95	74+057
2	0.7	101.5	-38.1	318.8	0.95	74+057
3	1.0	101.9	-24.5	318.7	0.95	74+057
4	5.0	149.1	-41.8	336.0	27.10	46+383
5	10.0	176.4	-60.6	361.2	46.20	28+794
6	15.0	181.9	-63.7	363.4	46.40	28+615
7	∞	183.0	-64.4	295.6	46.50	28+615

由图 6 可知,当泵后阀门分别采用 0.4、0.7、1.0 s 一段直线关闭时,泵后瞬时压降分别为 101.6、101.5、101.9 m,历时分别约为 0.4、0.7、1.0 s,最大降压值分别为 151.6、150.3、150.4 m。3 种方案的泵后瞬时降压值及最大降压值基本相等。由图 7 可知,桩号 0+000~74+500 之间的输水管道最大、最小压力包络线基本重合,而桩号 74+500~75+000 之间的管道压力却存在明显差异。这是因为当 $T_g \leq T_d$ 时泵后最大降压值相等,但瞬时降压的快慢不同。对于同一输水系统,泵后输水管道沿线压力的降压值与泵后降压值及降压速率有关。当 $T_g \leq T_d$ 时,泵后最大降压值相等,管道沿线压力的极值主要受到瞬时降压速率的影响。水锤波速约为 1 000 m/s,3 种不同关闭规律下,泵后瞬时降压历时分别约为 0.4、0.7、1.0 s,压力极值受出水池反射影响的管道理论距离分别为 0.20、0.35、0.50 km,说明泵后阀门关闭的越快,出水池向前反射保护的距離越短。管道压力极值受反射影响的区间为桩号 74+500~75+000。输水系统最小压力出现在此区间内,因此存在较明显的差异,而输水管道沿线最大压力不出现在此区间,不受出水池反射的影响,所以 3 种方案最大压力值相近。因此,阀门关闭的越快,输水管道沿线最小压力越小,越不利于输水管道安全。

当泵后阀门分别采用 1、5、10、15 s 一段直线关闭时,泵后瞬时压降(6 s 内)分别为 101.9、149.1、176.4、181.9 m,由图 7(a)、(b)可看出,该降压波的传播分别使得输水系统不同部位出现不同严重程度的负压。其中,泵后阀门采用 1.0 s 一段直线关闭规律关闭时,输水管道相对最安全,出现负压的管道长度小于 1 km,且位于输水管道末端。而泵后阀门采用 15 s 一段直线关闭规律关闭时,输水管道负压最严重,存在负压的管道长达 46.5 km。因此,当阀门的实际关闭时间 $T_g \geq T_d$ 时,输水管道沿线最大压力随关闭时间的减小而减小,而最小压力随关闭时间的减小而增加,即当 $T_g \geq T_d$ 时,泵后阀门关闭的越快,越有利于输水管道的安全。这是因为 4 种关闭规律下泵后降压的速率基本相同,当该时间段的降压波传至出水池时,出水池反射回的升压波波形也相同。此外,同一输水系统管道的摩阻相同,当 $T_g \geq T_d$ 时,输水管道降压值主要取决于泵后降压值的大小。阀门关闭的越快,泵后瞬时压降越小,导致输水管道沿线的降压越小,根据出水池的反射特性,相应管道升压也越小,从而有利于输水管

道的安全。

4 结论

对于高扬程输水泵站,如果水泵出口不设置防护措施,当阀门关闭时间 $T_g < T_d$ 时,泵后最大降压值相等,随着阀门关闭的速率增大,泵后瞬时降压速率增大,出水池向前保护的距離增长,有利于输水管道的安全;当阀门关闭时间 $T_g > T_d$ 时,随着阀门关闭速率的增加,泵后降压值也增加,输水管道负压段的长度变长,管道沿线最大压力变大,最小压力变小,不利于输水管道的安全。因此,高扬程输水泵站水泵抽水断电后泵后阀门的最佳关闭时间为 $T_g = T_d$ 。

参考文献:

- [1] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435.
- [2] 石林, 张健, 倪尉翔, 等. 具有特殊地形条件的长距离供水工程水锤防护[J]. 水力发电学报, 2019, 38

(5): 81-88.

- [3] STOKES Y M, MILLER A, HOCKING G. Pressure drop in pipelines due to pump trip event[J]. Anziam journal, 2015, 57: 163-204.
- [4] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSSELING A S. Water hammer with column separation: a historical review[J]. Journal of fluids and structures, 2006, 22 (2): 135-171.
- [5] 杨辉琴, 金波. 泵站止回阀关闭特征和条件的研究探讨[J]. 水利水电技术, 2016, 47(3): 106-108.
- [6] 刘芳, 张健, 石林, 等. 泵后球阀兼作泄压阀的水锤防护研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 184-187, 119.
- [7] 赵立杨, 冯梦雪, 李昊, 等. 气垫调压室联合单向塔的停泵水锤防护研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41 (5): 81-84, 47.
- [8] LIN SHI, JIAN ZHANG, XIAODONG YU, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects[J]. Water science and engineering, 2023, 16 (2): 211-218.

Research on Closing Law of Check Valve in High-lift Water Supply Systems

ZHAN Gui-quan, SHI Xiang-rong

(Zhejiang Jiuzhou Water-Control Technology Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: For water supply systems with high-lift, the pump-stopping water hammer caused by the power failure is usually greater than the direct water hammer caused by the check valve closing. Based on the Joukovsky equation and the pressure drop law behind the pump, the influence of the check valve closing law on the pressure along the pipeline was studied, and the theoretical value of the optimal closing time (i. e., $T_g = T_d$) was obtained when a pump trip occurred. The theoretical value was verified by numerical simulation through a practical project. The results show that for high-lift water supply projects, the theoretical closing time of the check valve can minimize the pressure drop along the pipeline when the pump trip occurred.

Key words: high-lift; water supply project; valve closing law; water hammer

(上接第 120 页)

Analysis of Deformation Characteristics of Deep Foundation Pit Dewatering Closes to the River Based on HS-Small Model

HUANG Jian-hua^{a,b}, LI Rui^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Underground Engineering, Fujian Province University, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The groundwater level in the deep foundation pit project close to the river shows a dynamic characteristic of long-term low water level but high water level during flood season. Foundation pit dewatering leads to the complexity of the seepage field in the surrounding stratum environment, destruction of enclosure structures, accidents include piping and instability at the bottom of the pit. Therefore, this paper simulated the excavation-precipitation process of deep foundation pit project based on the HS-Small constitutive model, analyzed the sensitivity of precipitation influencing factors (precipitation depth, mode, rate and water stop curtain) to the surrounding environment deformation and their relationship. Compared the analysis results with the measured results, it can be found that the settlement of the top of the foundation pit, the soil outside the pit and the surrounding buildings gradually increases, and the dewatering has a more obvious influence on the deformation during the excavation and dewatering of the foundation pit; Fractional precipitation can effectively reduce the settlement deformation of surrounding buildings and ground surface; It is recommended that the dewatering depth of foundation pit should be controlled within 0.5-2.0 m below the bottom plate; The precipitation rate has a relatively small impact on the total settlement of the surrounding environment, but has a great impact on the settlement rate. When the precipitation rate reaches the optimal value, it is beneficial to the stability control of the foundation pit. The embedded depth of water-proof curtain in this project is more than 30 m, which has no obvious effect on controlling the settlement of surrounding buildings. The research results can provide reference for the dewatering design and construction of similar deep foundation pit projects closed to the river.

Key words: projects closed to the river; HS-Small constitutive model; dewatering excavation; settlement mechanism; soft soil area