

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222588

基于 Bentley Hammer 的泵站输水系统管道优化前后的水力过渡过程研究

张 勇¹, 高余鑫², 高长景¹, 高志锺³

(1. 济南市水利工程服务中心, 山东 济南 250400; 2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016; 3. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 为了研究泵站输水系统管道优化前后事故停泵的水力过渡过程的特性, 基于实际工程, 运用 Bentley Hammer 软件, 建立泵站输水系统双泵并联机组数学模型, 研究两阶段不同关阀方案下管道优化前后对水锤压力、机组转速等最不利水锤参数的影响。结果表明, 管道优化后最大水锤压力降低了 3.76%~8.85%, 最小水锤压力提升了 4.89%~8.85%, 最大倒转速度提高了 1.47%~81.35%; 快关时间对最不利水锤参数有显著影响, 管道优化后泵站输水系统最不利水锤参数均比优化前提前发生。表明管道优化有效改善了泵站输水系统的水锤特性, 提高了泵站输水系统的安全性。

关键词: 泵站输水系统; 管道优化; 水力过渡过程; Bentley Hammer; 水锤参数

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0101-04

1 引言

提水灌溉泵站发生的水锤主要与水泵出口控制阀的启闭规律和事故停泵有关^[1]。有效降低事故停泵引起的泵站管道系统水锤压力, 对泵站输水系统的安全、高效和稳定运行具有重要意义。PARSASADR A 等^[2]发现间歇性关闭产生的水锤压力比突然关闭小得多; KIM SANG-GYUN 等^[3]利用特征线法对泵站断电后的水力瞬变过程和管道系统中的空气室进行数值计算, 确定了空气室的最佳设计尺寸; 王丽等^[4]通过数值模拟方法得到能有效降低或改善甚至消除泵站事故停泵水锤的缓闭蝶阀两阶段合理的关闭规律; 蒋白懿等^[5]采用 HAMMER 软件模拟水泵出口多功能控制阀的两阶段缓闭规律, 确定了两阶段线性合理的缓闭规律; 王丽等^[6]通过泵站水锤数值模拟得到水泵的最大倒转速度和输水管道最大压力随管道壁面糙率的增大而降低, 输水管道最小压力随管道壁面糙率的增大而升高的规律。在防止泵站水锤其他措施方面, 采取对输水管道设置两阶段液控蝶阀、空气阀、真空破坏阀的联合防护措施^[7]和两阶段关闭阀、单向调压塔、普通空气阀^[8]联合

等防护措施进行水锤计算。对于泵站输水系统水锤产生的过程及水锤防护措施已有较多研究, 但就泵站输水系统管道优化前后水力过渡过程的研究极少。为此, 本文基于特征线法的 Bentley Hammer 软件, 对田山二级泵站优化前后的输水管道在有无水锤防护措施下的水力过渡过程进行数值模拟, 分析管道优化前后输水系统水力过渡过程的特性, 旨在为泵站输水系统的改造提供参考。

2 工程概况

田山引黄泵站位于济南市平阴县, 包含一级泵站和二级泵站。以田山二级泵站双泵并联机组输水系统为研究对象, 进行管道优化前后的水力过渡过程计算。泵站装有 24SH-9A 型离心泵 20 台; 两台机组并联输水, 共 10 根主输水管道。进水池设计水位 37.40 m, 出水池水位 92.70 m, 泵站设计扬程 55.45 m。泵后阀门采用直径 500 mm 的电动液控偏心半球阀。

2.1 输水系统的优化

针对田山二级泵站的进水管和并联点前出水管道的不合理布置进行优化^[9], 优化目的是改善管道不合理的布置方式, 减小水力损失, 提高管

收稿日期: 2022-12-14, 修回日期: 2023-03-24

作者简介: 张勇(1972-), 男, 高级工程师, 研究方向为泵站工程管理与设计, E-mail: 709827065@qq.com

通讯作者: 高余鑫(1995-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为输配水工程水力过渡过程, E-mail: gaoyuxin19950117@163.com

道的水力性能,采用雷诺 N-S 方程和 $\kappa\text{-}\epsilon$ 湍流模型,在不同流量的约束下,对管道系统进行优化数值模拟。优化后的进水管和并联点前出水管不但减少了变径管道,增大了变径管道的长度,而且改变了原并联管道的连接方式,优化后进水管和并联点前出水管的水力损失分别比优化前降低 79%、48%,输水管道水力性能更优。

2.2 管线建模与水锤防护标准

2.2.1 管线建模

优化前的进水管和并联点前的出水管由长度较小的不同管径组成,而且两段管道的整体长度较短,因此管线建模时对其进行简化。优化前后输水管道系统的管线建模布置示意图见图 1。优化前后输水管道系统均为壁厚 8 mm、糙率 0.012 的钢管。

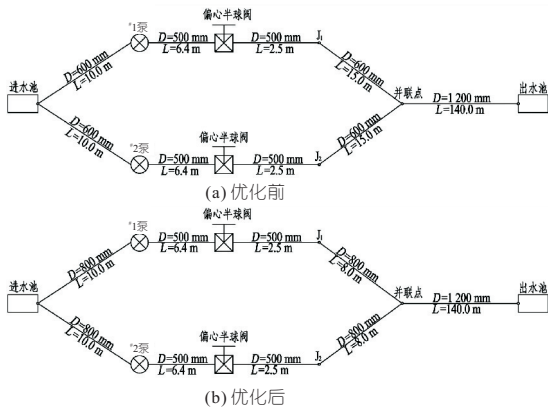


图 1 泵站输水系统管道布置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the pipeline layout of the water delivery system of the pumping station

2.2.2 水锤防护标准

根据《泵站设计标准》(GB50265-2022)^[10],结合该泵站输水管道长度短、扬程高的特点,水锤计算结果必须满足以下条件:①水泵最高反转速度不应超过额定转速的 1.2 倍,超过额定转速时间不应超过 2 min;②最高压力不应超过水泵出口额定压力的 1.3 倍;③最大负压应限制在 -2 m 以内。

3 研究方法 with 计算方案

3.1 水锤计算方法

Bentley Hammer 软件是基于特征线法求解水击运动微分方程和连续微分方程,结合输水系统边界和初始条件进行泵站水力过渡过程的计算^[1]。水锤方程中的管道摩阻系数运用谢才公式求得优化前后管道的综合摩阻系数^[6]分别为 $f_{\text{优化前}}=0.0222$ 、 $f_{\text{优化后}}=0.0202$ 。

3.2 计算方案

以两泵并联为研究对象,对管道优化前后有无防护措施的事故停泵工况进行水力过渡过程分析。液控偏心半球阀两阶段关闭规律为快关 3~10 s,间隔 1 s,快慢关时间比为 1:3,其中快关 80°,慢关 10°,共 8 种两阶段关阀方案进行计算。

4 计算结果分析

4.1 无水锤防护措施方案

泵站输水系统无防护措施时水锤计算结果见表 1。无防护措施情况下,管道优化前后的最高压力与水泵正常压力比分别为 0.983、0.979,远小于水泵防护标准的 1.3;最小压力分别为 -1.19、-1.24 m,大于限制值 -2 m;最大倒转速分别为机组额定转速的 1.560、1.575 倍,不满足水锤防护标准小于 1.2 倍要求。因此,应通过优化阀门关闭规律降低机组反转速度,保证水泵机组和输水管道系统安全稳定运行。

表 1 无防护措施的瞬态计算结果

Tab. 1 Transient calculation results without protective measures

管道状况	最大压力 /mH ₂ O	最小压力 /mH ₂ O	最大倒转速度 /rpm	最大倒转速度与额定转速的比值	最大正压力与额定压力的比值
优化前	54.52	-1.24	1 513.33	1.560	0.983
优化后	54.30	-1.19	1 518.13	1.575	0.979

4.2 有水锤防护措施方案

泵站输水系统发生事故停泵后,经对管道优化前后液控偏心半球阀不同关阀方案下水力过渡过程计算可知,输水系统最大、最小水锤压力均发生在泵后,为此对机组最大倒转速度、泵后最大压力和泵后最小压力等水锤参数进行分析。

4.2.1 管道优化前后的水泵转速对比

管道优化前后的机组最大倒转速度见表 2、图 2,达到最大倒转速的时间以及最大倒转速与

表 2 有防护措施的管道优化前后水泵转速变化

Tab. 2 Changes of pump speed before and after pipeline optimization with protective measures

关阀时间/s (快关+慢关)	最大倒转速度/rpm		最大倒转速与额定转速比值		达到最大倒转速的时间/s	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
3+9	-35.66	-64.67	0.037	0.067	10.766 0	9.873 4
4+12	-256.64	-314.29	0.265	0.324	5.294 6	4.108 2
5+15	-567.91	-625.44	0.585	0.645	4.739 9	4.653 0
6+18	-806.93	-853.76	0.832	0.880	5.269 4	5.197 7
7+21	-971.67	-1 007.77	1.002	1.039	5.773 7	5.651 7
8+24	-1 081.95	-1 109.56	1.115	1.144	6.126 6	6.105 6
9+27	-1 156.37	-1 178.21	1.192	1.215	6.630 9	6.423 4
10+30	-1 208.26	-1 226.06	1.246	1.264	6.922 7	6.883 0

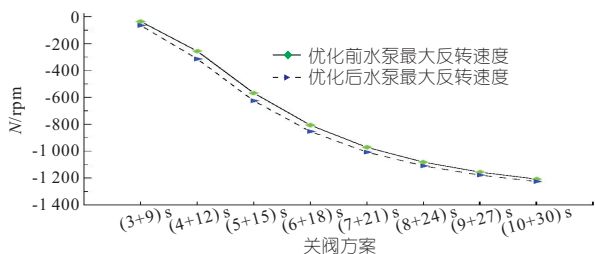


图 2 优化前后水泵最大倒转速度变化

Fig. 2 Changes in the maximum reverse speed of the water pump before and after optimization

额定转速比值见表 2。由表 2、图 2 可知,管道优化前后机组最大倒转速度均随着关阀时间的增加不断增大,而管道优化后机组最大倒转速度大于管道优化前的速度,且随着关阀时间的增加两机组最大倒转速度差值越来越小;当关阀时间 ≥ 20 s(快关 5 s+慢关 15 s)后,机组达到最大倒转速度的时间均小于快关时间,且随着快关时间的增加最大倒转速度不断增大,因此快关时间的长短是影响机组最大倒转速度的主要因素。由表 2 可知,优化前关阀时间小于 36 s(快关 9 s+慢关 27 s)和优化后关阀时间小于 32 s(快关 8 s+慢关 24 s)时,满足水锤防护标准的要求。

4.2.2 管道优化前后的水锤压力对比

管道优化前后的最大、最小压力随关阀时间的变化见表 3、图 3。由表 3、图 3(a)可知,管道优化前后最大压力随着关阀时间的增加逐渐降低,而达到最大压力的时间与快关时间基本相同,可见快关时间的长短直接影响最大压力的大小,这

表 3 有防护措施的管道优化前后压力变化

Tab. 3 Pressure changes before and after pipeline optimization with protective measures

关阀时间/s(快关+慢关)	最大压力/ mH_2O		最大压力与额定压力比值		达到最大压力的时间/s		最小压力/ mH_2O	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
3+9	90.07	82.10	1.62	1.48	2.975 1	2.996 1	-3.27	-3.11
4+12	82.91	76.98	1.50	1.39	3.983 6	3.994 8	-2.85	-2.71
5+15	78.01	72.84	1.41	1.31	4.992 1	4.993 5	-2.60	-2.37
6+18	72.98	67.73	1.32	1.22	6.000 6	5.992 1	-2.27	-2.12
7+21	68.52	64.91	1.24	1.17	6.958 6	6.990 8	-2.04	-1.94
8+24	65.95	63.10	1.19	1.14	7.967 1	7.989 8	-1.89	-1.79
9+27	64.14	61.58	1.16	1.11	8.975 6	8.988 2	-1.79	-1.69
10+30	63.04	60.67	1.14	1.09	9.984 1	9.986 9	-1.71	-1.62

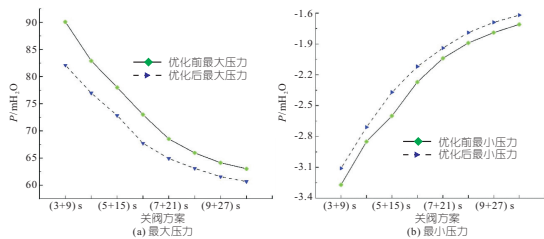


图 3 优化前后泵后压力变化曲线

Fig. 3 The pressure change of the pump before and after optimization

与文献[5]结果相同;管道优化后的最大压力均小于管道优化前的最大压力,随着关阀时间的增加二者差值逐渐减小;由表 3、图 3(b)可知,管道优化前后最小压力均随着关阀时间的增加不断增加,且优化后的最小压力比优化前有所提高;由此可见,优化后的输水管道对泵站最大、最小水锤压力有较好的防护作用。

由表 3 可看出,优化前的关阀时间大于 28 s(快关 7 s+慢关 21 s)和优化后的关阀时间大于 24 s(快关 6 s+慢关 18 s),满足水锤防护标准的要求;优化前的关阀时间大于 32 s(快关 8 s+慢关 24 s)和优化后的关阀时间大于 28 s(快关 7 s+慢关 21 s),满足最大负压限制在 -2 m 以内。

综上所述,管道优化后的最大倒转速度、最大压力和最小压力等水锤参数均比优化前有较好的改善。水锤参数的改善与优化后的进水管道的布置、管道附件的减少、管道直径的增大、管道摩擦系数的降低有关。管道优化后,不仅泵站正常运行时,输水管道内的水流通畅、流态稳定和水力损失小^[10],而且泵站发生水锤时,也减小了输水管道内不稳定水流受到的阻力,优化后管道对泵站输水系统水锤有较好的防护作用。

5 结论

a. 管道优化前后的最大水锤压力随着阀门两阶段关阀时间的增加逐渐降低,且优化后的最大水锤压力均小于优化前,管道优化对最大水锤压力有较好的削减作用;在不同关阀时间内,快关时间对最大水锤压力有显著影响;管道优化后的最小水锤压力比优化前得到了提高,管道优化后对最小水锤压力有较好的抑制作用。

b. 在不同关阀时间内,管道优化后的最大倒转速度均比管道优化前有所提高,提高幅度随着关阀时间的增加而减小;管道优化后的最大倒转速度时间早于管道优化前,且均小于快关时间,快关时间是影响最大倒转速度的主要因素。

参考文献:

- [1] 乔杜里. 实用水力瞬变过程(第 3 版)[M]. 程永光, 杨建东, 赖旭, 等, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [2] PARSASADR A, AHMADI A, KERAMAT A. Waterhammer caused by intermittent pump failure in pipe systems including parallel pump groups[J]. International journal of engineering, 2016, 29(4): 444-453.

[3] KIM SANG-GYUN, LEE KYE-BOCK, KIMK YUNG-YUP. Water hammer in the pump-rising pipeline system with an air chamber[J]. Journal of hydrodynamic, 2014, 26(4): 960-964.

[4] 王丽, 吴建华, 李琨, 等. 庄头泵站蝶阀关闭参数对停泵水锤的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 137-140.

[5] 蒋白懿, 李博, 刘培请, 等. 多功能水泵控制阀对短距离高扬程输水管线水锤防护效果的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 171-174.

[6] 王丽, 吴建华, 韩亚男, 等. 管道特性参数对庄头泵站停泵水锤的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 206-210.

[7] 刘金昊, 吴建华. 西山供水工程事故停泵水力过渡过程计算及水锤防护[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 113-116.

[8] 肖伟, 郑彪, 刘富峰, 等. 新疆某供水工程停泵水锤计算与防护措施选择[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 170-172, 114.

[9] 高传昌, 高余鑫, 孙龙月. 基于标准 κ - ϵ 紊流模型的泵站进水管路水力特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 106-113.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泵站设计标准: GB 50265-2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.

Study on Hydraulic Transition Process Before and After Pipeline Optimization of Pumping Station Water Delivery System Based on Bentley Hammer

ZHANG Yong¹, GAO Yu-xin², GAO Chang-jing¹, GAO Zhi-kai³

(1. Jinan Water Conservancy Engineering Service Center, Jinan 250400, China; 2. Henan Water Conservancy Survey and Design Research Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the hydraulic transition process of accidental pump stoppage before and after the pipeline optimization of pumping station water delivery system, based on the actual project, Bentley Hammer software was used to establish a mathematical model of the pumping station water delivery system with two pumps in parallel units to study the effects of the most unfavorable water hammer parameters such as water hammer pressure and unit speed before and after the pipeline optimization under different two-stage valve shutdown schemes. The results show that the maximum water hammer pressure decreased by 3.76%-8.85%, the minimum water hammer pressure increased by 4.89%-8.85%, and the maximum reversal speed increased by 1.47%-81.35% after pipeline optimization; The fast shutdown time had a significant effect on the most unfavorable water hammer parameters, and the most unfavorable water hammer parameters of the pumping station water delivery system all occurred before than before the optimization after pipeline optimization. It shows that the pipeline optimization effectively improved the water hammer characteristics and the safety of the pumping station water delivery system.

Key words: pumping station water delivery system; pipeline optimization; hydraulic transition process; Bentley Hammer; water hammer parameter

(上接第 116 页)

Hydraulic Transient Process Characteristics of Underground Roadway Group in Mine-type Pumped Storage Power Station

ZHANG Pei-ding¹, MIAO Mei², ZHU Li-zhi³, HAN Yun¹, WU Min², ZHOU Jian-xu³, MA Feng-lin¹, WANG Yu-fang¹, ZHANG Hong-liang¹, TENG Yun-long¹, LI Zun-long¹

(1. Shanghai Datun Energy Co., Ltd., Xuzhou 221611, China; 2. China Electric Power Development Research Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The phenomenon of mixed free-surface-pressure flow exists in the process of water level variation in the lower reservoir (roadway group) of mine-type pumped storage power station, which directly affects the operation stability of the system and the hydraulic safety of the roadway group. Based on 3D numerical simulation technology of hydraulic system, considering the three controlling cases including lower reservoir water filling, load rejection and pumping power failure, the characteristics of the transition process of water flow in roadway group and the evolution law of related hydraulic parameters were analyzed, and its influence on the hydraulic safety of roadway group was evaluated. The research shows that there is no obvious unfavorable flow pattern in the initial water filling process of the lower reservoir (roadway group); For load rejection with dead water level of the lower reservoir, the water level of the regulating pool decreases by less than 0.4 m, and for pumping power failure with the normal water level of the lower reservoir, the water level of the regulating pool increases by less than 10.0 m; The roadway group can enter and exhaust normally during the transition process, and the hydraulic transitions in the roadway section is smooth including the possible free-surface-pressure flow; The regulating pool and the ventilation channel meet the requirements of hydraulic optimization to ensure the hydraulic safety of the roadway group.

Key words: mine-type pumped storage power station; underground roadway group; ventilation duct; hydraulic transient process; numerical simulation