

高起伏长输管线水锤模拟及防护方案优选

高金良¹, 郑成志¹, 刁美玲¹, 金 溪², 杜明启³

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 430070 武汉;
3. 国投哈密能源开发有限责任公司, 839000 新疆 哈密)

摘 要: 针对长距离、高起伏、首尾落差不大的输水管线水锤防护方案难以准确确定的问题,建立了水锤防护设备模型,并以特征线法对其进行求解. 分别以双向调压塔、单向调压塔、真空吸气阀为管线负压防护设备,模拟分析事故停泵管线水锤防护效果,最终确定最优水锤防护方案. 结果表明,在管线坡峰处综合使用空气阀与真空吸气阀,水锤防护效果最好.

关键词: 长距离输水;水锤防护;水锤模拟计算;事故停泵;空气阀

中图分类号: TU991.39

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0024-03

Study on optimal surge protection for high-undulate long-distance water transmission pipeline

GAO Jin-liang¹, ZHENG Cheng-zhi¹, DIAO Mei-ling¹, JIN Xi², DU Ming-qi³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 430070 Wuhan, China;

3. SDIC Hamilton Energy Development Co., Ltd., 839000 Hami, Xinjiang, China)

Abstract: To make sure of surge protection scheme of water supply pipeline with long distance and huge terrain variation, this paper builds up a surge protection model and obtains the solution of the model by method of characteristics. Surge tank, one way surge tank and vacuum breaker were used as negative pressure protection equipment, then the optimal surge protection scheme was determined based on the simulated result of surge protection effects under the condition of pump trip. The results showed that when the air valve and vacuum breaker valve were installed together on the peak of the pipeline, the effect of surge protection is the best.

Key words: long distance water supply; surge protection; simulation of water hammer; pump trip; air valve

我国长距离输水管线普遍距离长、起伏大,水锤防护设备的优化选择存在较大难度. 该研究结合工程实例,建立水锤防护设备模型,根据不同水锤防护设备模拟计算结果,多方案技术经济比较后确定一个较佳的水锤防护方案^[1-3].

1 水锤防护设备模型建立

针对距离长、起伏大的输水管线,水锤防护设备有双向调压塔、单向调压塔、真空吸气阀^[4-7].

1.1 单向调压塔

$$Q_{p1} + Q_{p3} = Q_{p2},$$

$$Q_{p2} = C_a A_p \sqrt{2g(H_{p3} - H_p)},$$

$$H_{p3} = S_{\max} + Z - \frac{Q_{p3} + Q_3}{2} \cdot \frac{\Delta t}{F}.$$

$$\text{当 } H_{p3} \leq H_p, Q_{p3} = 0,$$

$$Q_{p1} = (-H_p + C_{pt})/B_1,$$

$$Q_{p2} = (H_p + C_{m2})/B_2.$$

式中: Q_{p1} 为流经调压塔前管内流量, m^3/s ; Q_{p2} 为流经调压塔后管内流量, m^3/s ; Q_{p3} 为流出调压塔流量, m^3/s ; C_a 为调压塔出口流量系数; A_p 为补水短管的过流面积, m^2 ; H_{p3} 为调压塔水位, m ; H_p 为管中压力, m ; $S_{\max}$ 为调压塔内浮球阀控制最高

收稿日期: 2012-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908064); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010-IV-052).

作者简介: 高金良(1971—),男,副教授.

通信作者: 高金良, gjl@hit.edu.cn.

水位(常数),m; Z 为塔相对于基准面高度,m; Q_3 为塔内流量, m^3/s ; Δt 为调压塔出流时间,s; F 为塔断面面积, m^2 .

1.2 双向调压塔

流入调压塔正向流^[8-9]

$$Q_{p3} = C_a A_p \sqrt{2g(H_p - H_{p3})}.$$

调压塔流出的逆向流

$$Q_{p3} = -C_a A_p \sqrt{2g(H_{p3} - H_p)},$$

$$Q_{p1} = Q_{p2} + Q_{p3},$$

$$H_{p3} = Z + S + \frac{Q_{p3} + Q_3}{2} \cdot \frac{\Delta t}{F},$$

$$S_p = H_{p3} - Z,$$

$$H_p = C_{p2} - B_1 Q_{p1},$$

$$H_p = B_2 Q_{p2} - C_{m2}.$$

式中 S_p 为调压塔内泄流或注水后水深,m.

1.3 真空吸气阀

空气以亚音速等熵流进($P_0 > P > 0.5283 P_0$)

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \sqrt{7P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{1.4286} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1.7143} \right]}.$$

式中: $\dot{m}$ 为流入空气的质量流率, kg/s ; C_{in} 为空气流入空气阀时的流量系数; A_{in} 为空气阀的进口面积, m^2 ; P 为空气阀内绝对压力,MPa; P_0 为大气绝对压力,MPa; ρ_0 为大气密度.

空气以临界流速等熵流进($P \leq 0.5283 P_0$)

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \frac{0.686}{\sqrt{RT_0}} P_0.$$

式中: R 为气体常数; T_0 为大气温度,K.

2 水锤防护设备模型求解

采用特征线法^[10-11]求解.水锤计算的特征差分方程为

$$Q_T = C_T - C_a H_T,$$

$$Q_T = C_n + C_a H_T,$$

$$C_T = Q_{L1} + C_a H_{L1} - C_f Q_{L1} |Q_{L1}|,$$

$$C_n = Q_{L2} - C_a H_{L2} - C_f Q_{L2} |Q_{L2}|.$$

式中: $C_a = \frac{gA}{a}$; $C_f = \frac{f\Delta t}{2DA}$; Q_{L1} 、 Q_{L2} 为管道 L1、L2 两点的瞬态流量; H_{L1} 、 H_{L2} 为管道 L1、L2 两点的瞬态水头; C_T 、 C_n 为水锤特征议程的特征参量; C_a 为管道的特征常数; C_f 为管道的摩阻性常数; g 为重力加速度; a 为水锤波速; f 为管道的阻力系数; Δt 为选定时间步长; D 为管道直径; A 为管道过流面积.

3 水锤防护方案优选实例

3.1 工程简介

HFG 输水工程位于我国东北辽宁省,设计输

水流量为 3 510 L/s.该工程为泵送单管输水,前端水池水位为 122.98 m,后端水池水位为 131.89 m,管线全长 36.3 km,均为钢管,承压能力为 1.3 MPa(局部 1.4 MPa),前段 28.9 km 管线直径为 DN1 800,后段 7.4 km 管线直径为 DN1 600.在距离管线起端 1 520 m 处有一座泵站,泵站前为重力流输水.

该管线多起伏,类似于多个 U 形管连接在一起.泵站内设有 3 台 DN300 压力波动预止阀,每台水泵后设有 1 台缓闭液控止回阀.管线上设计有 48 个缓闭式空气阀,口径为 DN200.

该工程稳态水力计算结果见图 1.可以看出,管线稳态运行时,管线各处自由水压远小于承压能力,管线承压能力满足稳态需求.

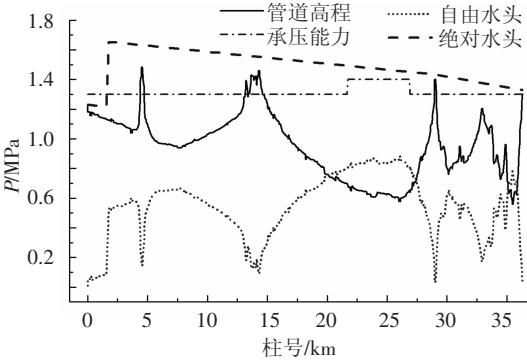


图 1 管线稳态运行状况

3.2 水锤防护方案优化

在 3.1 节的设备条件下,水锤防护效果见图 2.可以看出,事故停泵后局部管线负压严重,现有设备不能满足水锤防护要求,有必要增加水锤防护设备.

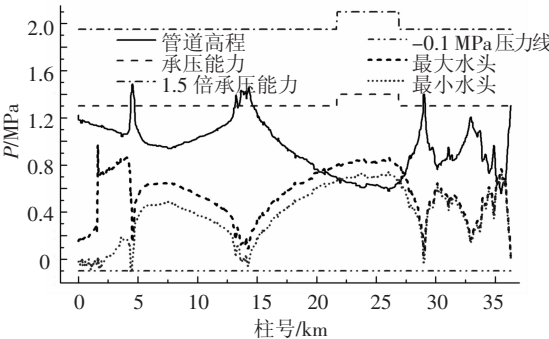


图 2 事故停泵水锤后果

针对 3 种管线负压防护设备,即双向调压塔、单向调压塔、真空吸气阀,分别给出一个可行的水锤防护方案,进行优化比较.

3.2.1 方案一(双向调压塔)

如图 3 所示,该方案在原设计基础上管线 A、B 两处分别增加 1 个双向调压塔,其中 A 处塔高

16 m, 直径 3.6 m, B 处塔高 9.5 m, 直径 2.8 m. 计算结果如图 4 所示. 可以看出, 事故停泵时, 全线最大水压 0.93 MPa, 全线几乎无负压, 最小压力达 -0.04 MPa, 满足水锤防护要求.

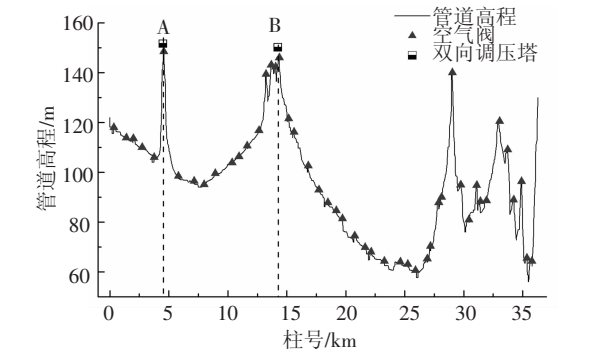


图 3 方案一—管线上的水锤防护设备

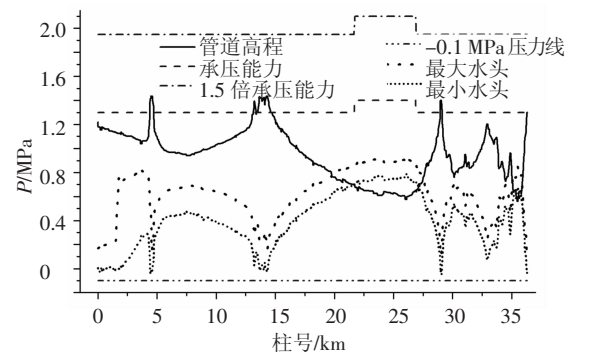


图 4 方案一事故停泵管道压力

3.2.2 方案二(单向调压塔)

相对于方案一, 方案二用单向调压塔代替 A、B 两处的双向调压塔, 其中 A 处的单向调压塔塔高 10 m, 直径 3 m, 水深 6 m; B 处的单向调压塔塔高 8 m, 直径 2.4 m, 水深 5 m. 并且 A、B 两处均增加一个 DN200 的缓闭式空气阀. 计算结果如图 5 所示. 可以看出, 事故停泵时, 全线最大水压 1.1 MPa, 管线起端有较长的负压段, 最小压力达 -0.05 MPa, 满足水锤防护需求.

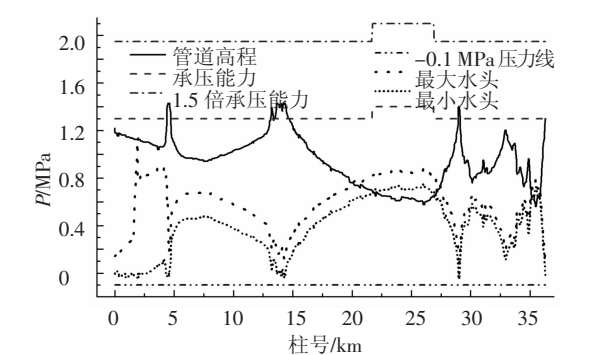


图 5 方案二事故停泵管道压力

3.2.3 方案三(真空吸气阀)

相对于方案一, 方案三用真空吸气阀代替 A、B 两处的双向调压塔, A、B 两处的真空吸气阀口

径均为 DN300. 并且 A、B 两处均增加一个 DN200 的缓闭式空气阀. 计算结果如图 6 所示. 可以看出, 事故停泵时, 全线最大水压 0.86 MPa, 管线起端有较长的负压段, 最小压力达 -0.04 MPa, 满足水锤防护需求.

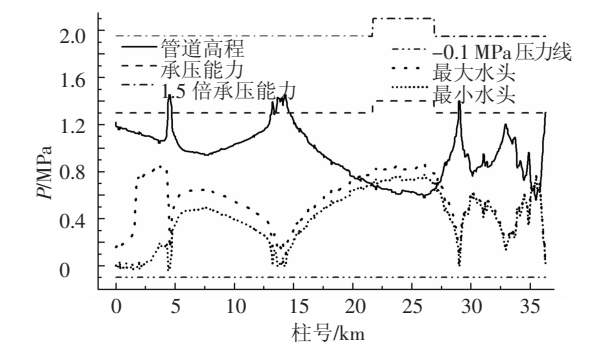


图 6 方案三事故停泵管道压力

3.3 方案优选

上述水锤防护方案的技术经济比较结果见表 1. 可以看出, 方案三因其工程造价低、设备简单且最易于实施, 最终被确定为最佳方案.

表 1 水锤防护方案优选

比较项目	方案一	方案二	方案三
水锤防护效	水锤防护效	水锤防护效	水锤防护效
技术性能	果最好; 水质 易受污染	果较差; 水质 易受污染	果较好; 水质 不易受污染
经济性能	造价高	造价较高	造价较低

4 结 论

1) 对于长距离、高起伏的长输管线, 在管线坡峰处设置真空吸气阀和空气阀, 水锤防护效果较为理想.

2) 进行水锤防护分析时, 需在不同方案下建立不同水锤防护设备模型并求解, 最终通过技术、经济综合比较优选出最佳的水锤防护方案.

参考文献:

[1] 周小兵, 张立德, 刘广林. 长距离调水工程管理信息系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 12 - 31.

[2] GAO Jinliang, CHANG Kui, CHEN Lizhi, et al. Subatmospheric pressure protection for large diameter long distance pipeline system: a case study[C]//International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Delft: IEEE, 2011: 399 - 404.

[3] 刘竹溪, 刘光临. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 126 - 131.