

# 重力流长距离输水系统调压井优选及评价

石 韬<sup>1</sup>, 王婷婷<sup>2</sup>, 高金良<sup>2</sup>

(1. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘 要:** 重力流输水工程利用天然的地形差输水,正常运行时,测压管水压高于静水压,在管道的闸阀关闭后,落差越大,净水压差值越高,对管段的水击压力也越大,大高差输水工程中被迫提高了管道的耐压等级,使工程造价升高。因此,在管道中间恰当位置设置调压井是降压的有效措施。结合内蒙古 YCJL 工程实例,在保证水系统安全运行的前提下,利用管网造价数学模型并用枚举法结合遗传算法求解,确定了调压井个数,使整个输水系统的投资建设费用最低。

**关键词:** 长距离输水; 重力流; 调压井; 数学模型; 水力过渡过程分析

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0049-04

## Optimization and Evaluation of Surge Shaft for Gravity-driven Long Distance Supply System

SHI Tao<sup>1</sup>, WANG Ting-ting<sup>2</sup>, GAO Jin-liang<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Hohhot 010020, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The gravity-driven water flow system takes advantage of the natural terrain to deliver water. Under normal operating conditions, the piezometric pressure is higher than the hydrostatic pressure. If a pipeline gate valve was closed, the pressure in the pipeline would equal the difference in water transportation elevations; therefore, larger difference in elevations could result in greater water hammer in the pipe, and subsequently lead to increases in pipe pressure ratings and project costs. Surge shaft, if properly positioned along the pipeline, is an effective measure to relief water hammer. Based on the YCJL project in Inner Mongolia, on the premise of safe operation of the water supply system, a mathematical model of costs of the water supply system was used, in combination with the enumeration method and the genetic algorithm, to determine the number of surge shafts required to minimize the cost throughout the water supply system.

**Key words:** long distance supply; gravity-driven water flow; surge shaft; mathematical model; hydraulic transition process analysis

城市给水管网系统的建设是城市基础工程设施的重要组成部分,决定着城市的发展水平。重力流输水过程中,从经济节约、造价合理的角度出发,在地形高差满足条件时可采用重力输水<sup>[1]</sup>。然

而重力输水受地形影响更大,尤其是在大流量、大高差条件下极易发生水锤。笔者研究证明在工程实例中可采用调压井防止水锤,并通过数学模型进行优化而确定调压井方案,在满足水锤防护的条件下,使工程总投资最低。

### 1 调压井边界数学模型

根据管道的  $C^+$  和  $C^-$  特征线方程、流量连续性原理及调压井边界条件,可建立如下方程组<sup>[2]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} C^+ \quad Q_{pi} = H_{i-1} - B(Q_{pi} - Q_{i-1}) - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \\ C^- \quad H_{pi} = H_{i+1} - B(Q_{pi} - Q_{i+1}) - RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \\ Q_{p1} = (C_{m1} - H_p)/B_1 \\ Q_{p2} = (H_p - C_{m2})/B_2 \\ Q_{p1} = Q_{p2} + Q_{p3} \\ H_p = S_p + \frac{1}{2F}(Q_{p3} + Q_p)\Delta t \\ S_p = H_p - Z \end{array} \right. \quad (1)$$

其中:

$$B = \frac{\alpha}{gA} \quad (2)$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (3)$$

$$C_m = H_{i+1} - BQ_{i+1} - RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (4)$$

式中,  $Q_{pi}$ 、 $H_{pi}$  代表时段终了时的参数,  $Q_i$ 、 $H_i$  代表时段初始时已知的参数;  $i$  为各断面排列序号, 管路起始端断面为  $i=1$ , 终端断面为  $i=N+1$ ;  $\alpha$ 、 $x$ 、 $t$  分别表示水锤波的传播速度、距离和时间;  $f$  表示管道的摩阻系数;  $D$  为管径;  $g$  为重力加速度;  $A$  为管道横截面积;  $Q_{p1}$ 、 $Q_{p2}$ 、 $Q_{p3}$  分别为调压井上游流入流量、流出流量和流入调压井流量;  $F$  为调压井的横截面积;  $Z$  为调压井处管道高程;  $S_p$  为调压井水位高度。

特征线法模拟计算水泵系统的暂态过渡过程均需要两个相容性方程联立求解, 可求解完全计算管路内部全部节点, 但是对于管路系统的两端来说, 仅有特征线方程组是不够的, 引入调压井边界条件方程即可求解。

### 2 管网造价数学模型

在实际工程中, 在满足水量、水质、水压要求的前提下, 尽可能使管道系统总投资费用最低, 即最经济。在重力供水系统中, 经常设置调压井进行水锤

防护, 设置调压井可有效降低管网承压, 从而降低管材的耐压等级, 进而降低管网造价。一般在管径范围确定、定线的前提下, 运用系统最优化方法, 即在满足最小关阀时间、运动方程、连续方程、压力要求和调压井数学模型的约束条件下, 使调压井、阀门和管道总投资最小。

系统最优化方法主要以数学规划模型为基础, 构建数学规划模型如下<sup>[3]</sup>:

$$F(\vec{X}) = F_1 + F_2 \quad (5)$$

系统最优化即保证  $F(x)$  值最小且满足如下约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{最小关阀时间} \quad t_{\min} \leq \text{最小关阀时间} \leq t_{\max} \\ \text{运动方程} \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{D} \times \frac{V^2}{2g} = 0 \\ \text{连续方程} \quad \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\alpha^2}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \text{压力要求} \quad H_{\max} \leq 1.3H_0 \quad H_{\min} \geq 0 \\ \text{调压井边界数学模型} \end{array} \right. \quad (6)$$

式(5)中:

$$F_1 = \sum_{i=1}^J (A_i + B_i) \quad (7)$$

$$F_2 = \sum_{j=1}^J L_j \times Y_j + \sum_{j=1}^J L_j \times Y_j + \dots + \sum_{j=1}^J L_j \times Y_j + \sum_{j=1}^J L_j \times Y_j \quad (8)$$

式中,  $F_1$ 、 $F_2$  分别为调压井和阀门总投资、管道总投资, 万元;  $H$  为管中某点的水头,  $m$  ( $1 \text{ m}$  水柱产生的压力约为  $9.8 \text{ kPa}$ , 下同);  $V$  为管内流速,  $m/s$ ;  $\alpha$  为水锤波传播速度,  $m/s$ ;  $x$  为管路中某点坐标;  $t$  为时间,  $s$ ;  $f$  为管路摩阻系数;  $i$  为调压井个数;  $j$  为管道承压种类个数;  $k$  为已知管径种类个数;  $A_i$  为第  $i$  个调压井造价, 万元;  $B_i$  为第  $i$  个阀门造价, 万元;  $L_j$  为第  $j$  类承压下的管道长度,  $m$ ;  $Y_j$  是管径为  $DN_k$  时第  $j$  类承压下的管道单价, 万元;  $t_{\min}$ 、 $t_{\max}$  为最小关阀时间的下限与上限,  $s$ ;  $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 、 $H_0$  分别代表管道最大水压力、管道最小压力、管道最大工作压力,  $m$ 。

由上可知自变量: 调压井个数及位置, 调压井和阀门造价, 管径, 最小事故关阀时间。因变量: 调压井个数及位置影响管道承压, 进而决定管道耐压等级和管材造价。该优化问题为混合离散变量优化问题, 可利用枚举法结合遗传算法求解, 限于篇幅求解过程省略。

### 3 工程算例

内蒙古 YCJL 工程为重力流供水系统。全长为 206. 26 km,前 103. 64 km 为 DN2 600(后端有 68. 5 km 的管道扩径成 DN2 800) 双管并行铺设,后 102. 62 km 为 DN3 200 单线铺设。管线首尾水池的水位落差为 72. 32 m,管线沿途最大落差为 143. 70

m。管材为 PCCP。该工程的设计水量为 12. 78 m<sup>3</sup>/s,最大流量为 15. 33 m<sup>3</sup>/s。沿途有五处分水口,设计分水总量为 5. 18 m<sup>3</sup>/s,最大分水总量为 6. 21 m<sup>3</sup>/s。

管线拓扑示意图见图 1。其中加大流量(远期规划流量)为设计流量的 1. 3 倍。

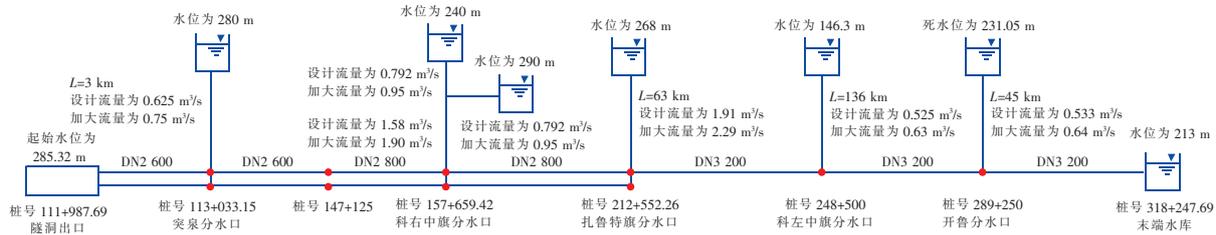


图 1 管线拓扑示意

Fig. 1 Schematic diagram of pipeline topology

### 4 水锤防护方案优选

全线静压较大,导致管材设计承压较高。根据管线静压及管线落差,建议在原设计基础上,设置调压井和调流调压阀降低管线承压等级,从而减少工程投资。根据地势特点,调压井建议方案分三种,下文以方案一(3 个调压井和 3 个调流调压阀)为例,通过管网造价数学模型计算,分析调压井对管道总投资的影响。

#### 4.1 方案一计算结果

设置 3 个调压井和 3 个调流调压阀。出于运行安全角度考虑管道末端控制阀最小安全关阀时间为 1 200 s,计算结果见图 2。可知,满足水锤防护要求。

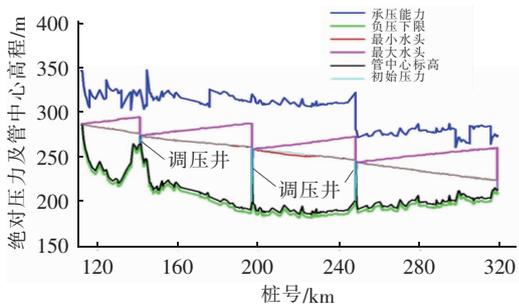


图 2 水锤压力包络线

Fig. 2 Water hammer pressure envelope

#### 4.2 投资估算

设置不同数量的调压井对管道降压有不同的影响,调压井个数多,对管道的耐压等级要求低,所以在确定管径的情况下,承压越低则管材造价就越低。根据地方参数,管材造价见表 1,调压井造价见图 3。

其中调压井前阀组单价为 3 000 万元,根据管网造价数学模型以及管材和调压井造价,可以计算三个方案的总投资。

表 1 管材造价

Tab. 1 Pipe cost

承压/ MPa	DN2 600 单价/万元	DN2 800 单价/万元	DN3 200 单价/万元
0.6	714. 25	849. 21	1 034. 36
0.8	761. 81	903. 34	1 078. 23
1.0	844. 27	953. 62	1 249. 38
1.2	902. 87	1 008. 24	1 324. 51
1.4	967. 39	1 037. 21	1 373. 99
1.6	1 014. 12	1 069. 31	1 400. 97

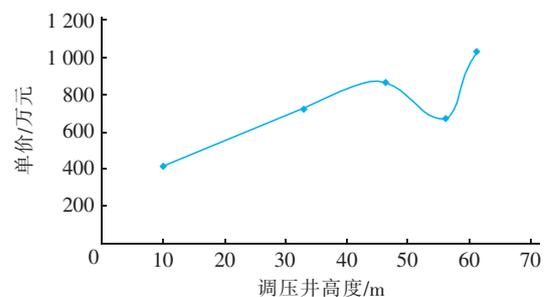


图 3 调压井造价

Fig. 3 Cost of surge shaft

#### 4.3 投资比较

当全线不设调压措施时,管道设计承压最高,总投资最大,约为 238 614. 28 万元;当设置调压井等调压措施时,随着调压井数量的增加(3、4、5 个),管道和调压措施总投资降低(219 675. 2、218 982. 66、219 920. 98 万元)。各调压井方案下投资估算相差

并不太多,设计院可以根据实际情况选取适宜的方  
案。

## 5 结论

从经济节约、造价合理的角度出发,在地形高差  
满足条件时,采用重力流输水省时省力。大高差重  
力流输水工程管道的耐压等级高,进而使工程造价  
升高。在管道中间恰当位置设置调压井是降压的有  
效措施,可以起到水锤防护的作用。结合内蒙古  
YCJL工程实例,利用管网造价数学模型并用枚举法  
结合遗传算法进行求解,确定了调压井个数,在保  
证供水安全的前提下,使整个输水系统的投资建设  
费用最低。

## 参考文献:

- [1] 董玉娥. 大流量大高差重力流输水过程的水锤防护研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [2] 刘梅清,刘光前,闵家驹,等. 调压井在复杂泵系统水锤防护中的应用[J]. 武汉水利电力大学学报,1995,

28(1):8-14.

- [3] 杨远东,邓志光. 停泵水锤计算及其防护措施[J]. 中国给水排水,2000,16(5):29-32.



作者简介:石韬(1976-),男,内蒙古呼和浩特人,大学本科,高级工程师,研究方向包括给排水、水工结构等。

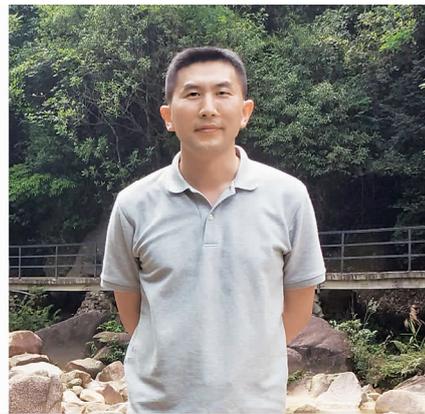
E-mail:St96041@163.com

收稿日期:2016-08-12

(上接第48页)

- [2] 张叮叮. DMA技术在供水小区管网运营分析中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(23):60-63.
- [3] 中国水利学会. 中国水利学会2014学术年会论文集(下册)[M]. 南京:河海大学出版社,2014.
- [4] Farley M, Wyeth G, Ghazali Z B M, et al. 无收益水量管理手册[M]. 侯煜堃,王莹莹,许月霞,等译. 上海:同济大学出版社,2011.
- [5] 潘浩,陆宇尘,李明,等. 用户夜间用水量测量及其在漏损控制中的应用[J]. 给水排水,2012,38(5):95-98.
- [6] 陆宇尘,潘浩,张晓兰,等. 如何在计量分区中通过漏损分离进行漏损控制[J]. 给水排水,2013,39(S1):505-509.
- [7] 盛骤,谢世千,潘曾毅. 概率论与数理统计(第4版)[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [8] 董驹萍,吴珊,刘阔,等. DMA不可避免漏失量计算值与实测值对比分析[J]. 给水排水,2014,40(S1):366-369.
- [9] Morrison J. Managing leakage by district metered areas: a

practical approach[J]. Leakage Control,2004,(2):44-46.



作者简介:刘晓飞(1977-),男,山东潍坊人,博士,高级工程师,主要研究方向为给水处理技术及管网漏损控制技术与管管理。

E-mail:lx\_hit@aliyun.com

收稿日期:2016-10-12