

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.01.011

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式: 闫天柱, 王晓敏, 李小周, 朱满林. 长距离树状重力流系统水锤防护研究[J]. 西安理工大学学报, 2023, 39(1): 105-109.

YAN Tianzhu, WANG Xiaomin, LI Xiaozhou, ZHU Manlin. Study on water hammer protection of long distance treelike gravity flow system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(1): 105-109.

# 长距离树状重力流系统水锤防护研究

闫天柱<sup>1</sup>, 王晓敏<sup>2</sup>, 李小周<sup>3</sup>, 朱满林<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024; 2. 西安佰利隆市政工程设计有限公司, 陕西 西安 710100; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为研究不同工况下长距离树状重力流系统水锤特性,应用水锤基本理论和特征线法,结合某实际工程,对长距离树状重力流系统在稳态、末端阀门同时及分别关闭和开启等不同工况下的水力过渡过程进行分析计算。结果表明:随着关闭时间的延长,管道中的最大压力逐渐减小,最小压力逐渐增大,当关闭时间达到一定长度时,管道中最大、最小压力基本保持不变;管道末端阀门同时关闭时,管道中的最大压力明显大于管道末端阀门分别关闭时的压力;管道末端阀门的开启时间的变化对管道中正压和负压的影响不大;管道末端阀门同时及分别开启时管道中的正压相差不大;管道末端阀门分别开启时管道中的负压比阀门同时开启时的负压小。

**关键词:** 水力学; 重力流; 树状系统; 水锤计算

中图分类号: TV134.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)01-0105-05

## Study on water hammer protection of long distance treelike gravity flow system

YAN Tianzhu<sup>1</sup>, WANG Xiaomin<sup>2</sup>, LI Xiaozhou<sup>3</sup>, ZHU Manlin<sup>3</sup>

(1. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China;

2. Xi'an Baililong Municipal Engineering Design Co., Ltd, Xi'an 710100, China;

3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the water hammer characteristics of long distance treelike gravity flow system in different working conditions, the basic theory for water hammer and characteristic line method are applied. Combined with a practical project, the hydraulic transition process of long distance treelike gravity flow system is analyzed and calculated under different conditions such as steady state, simultaneous and separate closing and opening of terminal valves. The results show that with the extension of valve closing time, the maximum pressure in the pipeline decreases gradually and the minimum pressure increases gradually. When the valve closing time reaches a certain length, the maximum and minimum pressure in the pipeline remain basically unchanged. When the valves at the end of the pipeline are closed at the same time, the maximum pressure in the pipeline is obviously greater than the pressure when the valves at the end of the pipeline are closed separately. The change of the opening time of the valve at the end of the pipeline has little effect on the positive pressure and negative pressure in the pipeline. There is little difference in the positive pressure in the pipeline when the valve at the end of the pipeline is opened at the same time and separately. When the valves at the end of the pipeline are opened separately, the nega-

收稿日期: 2021-06-17; 网络首发日期: 2022-12-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.N.20221212.1735.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479160);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(19JS046);陕西省自然科学基金研究计划项目(2021JQ-479)

通信作者: 闫天柱,男,硕士,工程师,研究方向为供水工程理论与技术。E-mail: tomytz@126.com

tive pressure in the pipeline is smaller than that when the valves are opened simultaneously.

**Key words:** hydraulics; gravity flow; treelike system; water hammer calculation

随着我国国民经济的发展,长距离输水工程日益增多,如何保证长距离输水工程安全运行则至关重要<sup>[1-2]</sup>。重力流输水系统依靠管道起末点地形的高差输水,管线多顺地势敷设,具有落差大、距离长等特点<sup>[3-4]</sup>。树状重力流系统水源单一,用水点较多,与单一用水点的重力流输水系统相比,树状重力流系统更为复杂,瞬变过程存在更多的不确定性因素<sup>[5]</sup>。而对输水系统水锤的准确分析,是保障长距离树状重力流系统安全运行的关键。白绵绵等<sup>[6]</sup>的研究表明,设置旁通阀能明显改善输水管线的压力波动情况。吴远为等<sup>[7]</sup>建立了爆管水力学模型,比较了不关阀和关阀条件下管线的压力瞬变过程,发现利用爆管点上下游液控阀的关闭规律,能够明显减小爆管泄漏量,可避免爆管后二次水锤及次生危害。张景望等<sup>[8]</sup>研究了调流调压阀、超压泄压阀等对重力流输水系统水锤防护的影响。王祺武等<sup>[9]</sup>分析了不同的阀门关闭及阀门配置方式对水锤防护的影响,认为单阀、双阀和三阀调节在管路中能起到较好的水锤防护效果。董茹等<sup>[10]</sup>就带分支线的重力输水系统末端阀门在不同关阀程序下水锤压力的变化特点及影响进行了分析研究。结少鹏等<sup>[11]</sup>对重力流多支线输水系统的多种水锤防护措施的设置位置和原则进行了分析,发现在管线上游的高点设置双向调压塔,对控制管道的正压、负压以及消减断流、弥合水锤有明显的效果。

目前,关于长距离树状重力流系统水锤防护的研究,主要侧重于关阀过程以及与其他防护措施的结合,而对于树状系统末端阀门不同时关闭及末端阀门开启时的水锤影响研究较少。鉴于树状重力流系统的复杂性及其对水力过渡过程的不确定性影响,本文结合工程实例,对长距离树状重力流系统在稳态、末端阀门同时及分别关闭和开启等不同工况下的水力过渡过程进行分析计算,得到了长距离树状重力流系统管道末端阀门不同的关闭和开启方式对水锤防护的影响规律,可为类似工程提供参考。

## 1 计算方法及建模

### 1.1 特征线法

$$C^+ \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{c}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{cf}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = c \end{cases} \quad (1)$$

$$C^- \begin{cases} \frac{dH}{dt} - \frac{c}{g} \frac{dv}{dt} - \frac{cf}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -c \end{cases} \quad (2)$$

式中:以同一基准面为标准, $H$ 为某断面 $t$ 时刻的水头, $m$ ;  $c$ 为水锤波速, $m/s$ ;  $g$ 为重力加速度;  $f$ 为输水管道的摩擦阻力系数;  $D$ 为输水管道的直径, $m$ ;  $V$ 为某断面 $t$ 时刻的流速, $m/s$ 。

假设 $A$ 、 $B$ 及 $P$ 为管道上三个相邻的断面,断面之间的距离为 $\Delta x$ , $t$ 时刻特征线方程如图1所示。

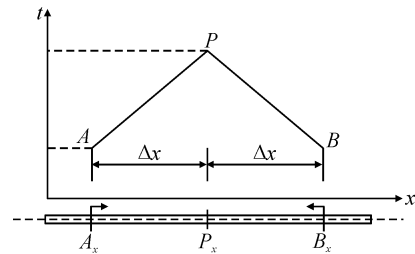


图1 特征线方程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of characteristic line equation

### 1.2 边界条件

#### 1.2.1 上游端为恒定水位水池

对于容积大的水池(或水库),短时间内池水位(或库水位)是不会发生变化的,即管道入口处的水池水头为常数。当考虑管道流速水头 $\frac{Q_p^2}{2gA^2}$ 和进口阻力水头损失 $\frac{\xi Q_p^2}{2gA^2}$ 时,上游为恒定水位水池(或水库)的边界方程为:

$$H_p = H_R - (1 \pm \xi) \frac{Q_p^2}{2gA^2} \quad (3)$$

式中: $H_p$ 为管道的水头; $H_R$ 为水库的水头; $\xi$ 为进口阻力水头损失系数(正向流动时,系数前的符号取“+”;反向流动时,系数前符号取“-”)。

当管道流速水头和进口阻力水头损失系数较小而可以忽略时,上游为恒定水位水池的边界方程可简化为(图2):

$$H_p = H_R \quad (4)$$

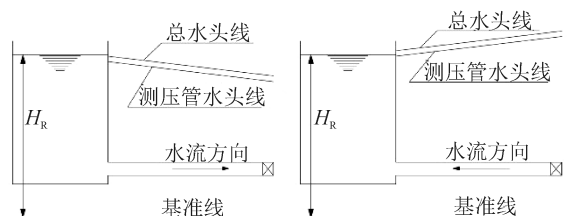


图2 上游恒定水位水池

Fig. 2 Upstream constant water level pool

### 1.2.2 下游端为阀门

在稳定流态时,通过阀门的流量为:

$$Q_0 = (C_d A_g)_0 \sqrt{2gH_0} \quad (5)$$

式中:  $(C_d A_g)_0$  为稳定状态时阀门阻力系数  $C_d$  和阀门面积  $A_g$  的乘积;  $H_0$  为过阀水头损失;  $Q_0$  为稳定状态时的流量。

在瞬变状态时,通过阀门的流量可表示为:

$$Q_p = (C_d A_g) \sqrt{2gH_p} \quad (6)$$

定义阀门的相对开度为:

$$\tau = \frac{C_d A_g}{(C_d A_g)_0} \quad (7)$$

由上述方程联立可得:

$$Q_p^2 = \frac{(\tau Q_0)^2}{H_0} H_p \quad (8)$$

与正特征线方程  $H_p = C_p - BQ_p$  联立求解可得:

$$Q_p = 0.5(-BC_v + \sqrt{(BC_v)^2 + 4C_v C_p})$$

式中:  $C_v = \frac{\tau^2 Q_0^2}{H_0}$ 。

## 2 实例分析

### 2.1 工程概况

某长距离树状重力流输水系统,以重力自流方式由上游水库分别给后寺河、西泗河、东泗河河道补充生态用水。水库至后寺河分岔点管段长 7.45 km;后寺河分岔点至西泗河分岔点管段长 6.11 km;后寺河支管长 0.88 km;西泗河支管长 1.2 km;西泗河分岔点至东泗河受水点管段长 7.86 km。3~11月,每天8点到20点时段常流水,管道总流量为 1.848 m<sup>3</sup>/s,其中后寺河 1.108 8 m<sup>3</sup>/s、西泗河 0.436 8 m<sup>3</sup>/s、东泗河 0.302 4 m<sup>3</sup>/s。管道布置如图 3 所示。

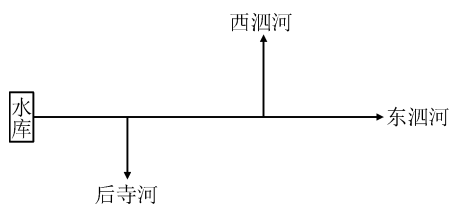


图 3 管道布置示意图  
Fig. 3 Piping layout schematic

### 2.2 计算及分析

长距离树状重力流输水系统初始稳态工况分析计算:本工程总设计流量为 1.848 m<sup>3</sup>/s,其中后寺河、西泗河、东泗河设计流量分别为 1.108 8 m<sup>3</sup>/s、0.436 8 m<sup>3</sup>/s、0.302 4 m<sup>3</sup>/s,为控制出水流量,在管

道末端设置流量控制阀,初始阀门开度 100%。计算结果如图 4、图 5、图 6 所示。

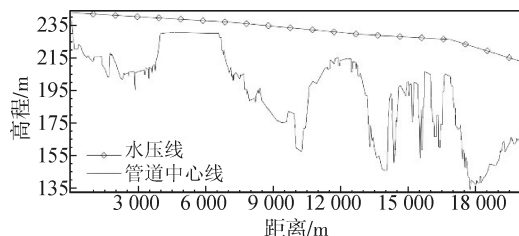


图 4 主干管(东泗河)管道稳态压力线  
Fig. 4 Steady-state pressure line of the main pipe(Dongsu River)

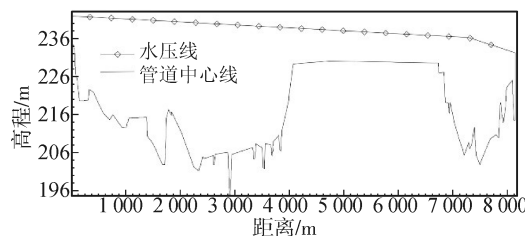


图 5 后寺河管道稳态压力线  
Fig. 5 Steady-state pressure line of Housi River pipeline

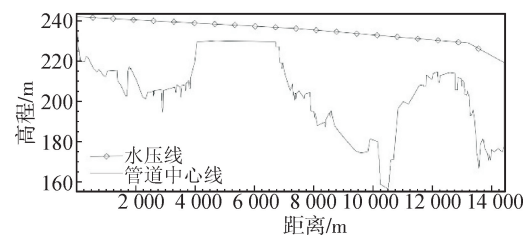


图 6 西泗河管道稳态压力线  
Fig. 6 Steady-state pressure line of Xisihe River pipeline

由图 4~图 6 可知,稳态工况下,重力流输水系统的稳态压力均在管道设计承压范围内。

长距离树状重力流输水系统的关阀水力过渡过程分析计算:对本工程后寺河、西泗河、东泗河管道末端阀门历时 50 s、100 s、160 s、220 s、280 s、340 s、400 s 同时以及分别从阀门开度 100%到 0 线性关闭时的水力过渡过程进行分析计算,计算结果如表 1 所示。

由表 1 的计算结果可知,同一关阀时间下,管道末端阀门同时关闭时管道中的正压明显大于管道末端阀门分别关闭时的正压。末端阀门同时关闭(50 s)时,管道中最小压力-9 m,管线多处出现水柱拉断情况。随着末端阀门关闭时间的延长,管道中的正压减小,管道中最小压力基本维持在 4.4 m。同一关阀时间下,末端阀门同时关闭时,管道中由于水锤波的相互叠加效应,使得管线压力增大,明显大于末端阀门分别关闭时的情况。

表 1 管道末端阀门不同关闭情况下的水锤计算结果

Tab.1 Water hammer calculation results under different valve closing conditions at the end of the pipeline

关闭方式	管段	50 s 线性		100 s 线性		160 s 线性		220 s 线性		280 s 线性		340 s 线性		400 s 线性	
		关闭		关闭		关闭		关闭		关闭		关闭		关闭	
		管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m
末端阀门同时关闭	主干管	262.7	-9	159.6	4.3	132.8	4.4	123.7	4.4	119.2	4.4	116.7	4.4	115.1	4.4
	后寺河	112.3	-9	60.2	4.3	51.4	4.4	49.8	4.4	49.0	4.4	48.6	4.4	48.3	4.4
	西泗河	200.9	-9	115.7	4.3	99.8	4.4	94.3	4.4	91.8	4.4	90.3	4.4	89.3	4.4
东寺河端阀门关闭	主干管	138.5	4.4	116.2	4.4	108.4	4.4	105.9	4.4	104.5	4.4	103.7	4.4	103.2	4.4
	后寺河	47.3	4.4	46.1	4.4	45.7	4.4	45.6	4.4	45.5	4.4	45.5	4.4	45.4	4.4
	西泗河	90.8	4.4	86.0	4.4	81.0	4.4	80.3	4.4	79.9	4.4	79.8	4.4	79.7	4.4
后寺河端阀门关闭	主干管	109.7	4.3	98.9	4.4	95.6	4.4	94.3	4.4	93.7	4.4	93.4	4.4	93.1	4.4
	后寺河	60.8	4.3	50.3	4.4	48.5	4.4	47.8	4.4	47.5	4.4	47.3	4.4	47.2	4.4
	西泗河	100.3	4.3	87.9	4.4	83.9	4.4	82.3	4.4	81.6	4.4	81.2	4.4	80.9	4.4
西泗河端阀门关闭	主干管	113.3	4.4	101.9	4.4	98.7	4.4	97.5	4.4	96.9	4.4	96.6	4.4	96.4	4.4
	后寺河	47.9	4.4	46.4	4.4	46.1	4.4	45.9	4.4	45.8	4.4	45.8	4.4	45.7	4.4
	西泗河	95.0	4.4	85.7	4.4	83.2	4.4	82.2	4.4	81.7	4.4	81.4	4.4	81.3	4.4

长距离树状重力输水系统的开阀水力过渡过程分析计算:当输水系统再次通水时,需要在初始流量为零的条件下开启管道末端阀门,对管道末端阀门分别以 240 s、300 s、360 s、420 s、500 s 同时以及分别从阀门开度 0 到 100%线性开启时的水力过渡过程进行分析计算,计算结果如表 2 所示。

由表 2 的计算结果可知,管道末端阀门开启时

间的变化对管道中正压和负压的影响不大;管道末端阀门同时开启以及分别开启时,管道中的正压相差不大,没有明显的趋势;管道末端阀门开启时,管道中的水锤波经历了减压逆波、减压顺波两个过程,当管道末端阀门同时开启时,管道中的水锤波相互叠加进而造成管道中的负压比阀门分别开启时的负压大。

表 2 管道末端阀门不同开阀情况下的水锤计算结果

Tab.2 Water hammer calculation results under different valve opening conditions at the end of the pipeline

开阀方式	管段	240s 线性开阀		300s 线性开阀		360s 线性开阀		420s 线性开阀		500s 线性开阀	
		管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m	管道最大压/m	管道最小压/m
末端阀门同时开启	主干管	108.6	-7.2	108.6	-7.2	108.6	-7.2	108.6	-7.2	108.6	-7.2
	后寺河	57.7	-4.4	57.7	-4.4	57.2	-5.4	57.2	-5.4	57.2	-5.4
	西泗河	95.0	-5.1	95.0	-5.1	85.1	-5.1	85.1	-5.1	85.1	-5.1
东寺河端阀门开启	主干管	110.7	-7.2	110.7	-7.2	108.6	-7.2	108.6	-7.2	108.6	-7.2
	后寺河	59.0	-2.1	59.0	-2.9	58.7	-2.9	58.7	-2.9	58.7	-2.9
	西泗河	95.0	-5.1	106.4	-3.4	100.2	-3.3	100.2	-3.3	100.2	-3.3
后寺河端阀门开启	主干管	131.3	-3.6	131.3	-3.6	128.7	-0.9	128.7	-0.9	128.7	-0.9
	后寺河	55.2	-3.6	55.2	-3.6	55.3	-2.8	55.3	-2.8	55.3	-2.8
	西泗河	94.9	-0.9	94.9	-0.9	94.0	-0.9	94.0	-0.9	94.0	-0.9
西泗河端阀门开启	主干管	158.5	-5.1	128.8	-3.4	128.8	-3.4	128.8	-3.4	128.8	-3.4
	后寺河	56.8	-1.4	55.5	-1.3	55.5	-1.3	55.5	-1.3	55.5	-1.3
	西泗河	107.4	-5.1	89.5	-5.1	89.5	-5.1	89.5	-5.1	89.5	-5.1

### 3 结 论

通过对长距离树状重力流输水系统在稳态、管道末端阀门同时及分别关闭和开启等不同工况下的水力过渡过程进行分析计算,主要得到如下结论。

1) 随着关阀时间的延长,管道中的最大压力逐渐减小,最小压力逐渐增大;当关阀时间达到一定长度时,管道中最大、最小压力基本保持不变,且管道中不会出现负压;管道末端阀门同时关闭时,管道中的最大压力明显大于管道末端阀门分别关闭时的压力。

2) 管道末端阀门的开启时间的变化对管道中正压和负压的影响不大;管道末端阀门同时和分别开启时,管道中正压相差不大,没有明显的趋势;管道末端阀门分别开启时管道中的负压比阀门同时开启时的负压小。

3) 对于长距离树状重力流输水系统,末端阀门分别开启和关闭时的水锤防护效果明显优于末端阀门同时开启和关闭时的效果。

#### 参考文献:

- [1] 杨玉思. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程[M]. 北京:中国计划出版社,2005.
- [2] 朱满林,沈冰,张言禾,等. 长距离压力输水工程水锤防护研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(1):40-43.  
ZHU Manlin, SHEN Bing, ZHANG Yanhe, et al. Research on protection of water hammer in long-distance pressurized water transfer pipeline project[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2007, 39(1): 40-43.
- [3] 蒋小鹏,结少鹏. 长距离高落差重力流输水管道水锤特性分析[J]. 人民黄河,2015,37(11):103-106.  
JIANG Xiaopeng, JIE Shaopeng. Research on water hammer characteristics of long distance water supply system with high fall head[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 103-106.
- [4] 杨庆华,翟龙,罗欢. 长距离高落差有压重力流输水特性研究[J]. 给水排水,2015,41(12): 96-100.  
YANG Qinghua, ZHAI Long, LUO Huan. Study on the hydraulic characteristics of gravity water transmission system with long distance and high fall head[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(12): 96-100.
- [5] 李小周. 泵系统和树状重力流系统瞬变控制方法研究及应用[D]. 西安:西安理工大学,2017.

LI Xiaozhou. Research and application of the transient control method to pump systems and tree gravitational flow systems [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

- [6] 白绵绵,王福军,雷澄,等. 旁通阀对长距离重力流输水管线水力过渡过程的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1):58-62.  
BAI Mianmian, WANG Fujun, LEI Cheng, et al. Effect of bypass valve on hydraulic transient process in long water transport pipelines with gravity flow [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(1): 58-62.
- [7] 吴远为,刘梅清,刘志勇,等. 长距离重力流输水系统的爆管过渡过程和阀门关闭规律的研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7):119-123.  
WU Yuanwei, LIU Meiqing, LIU Zhiyong, et al. Research on the pipe burst transient progress and valve closure law of long-distance and gravity flow water supply system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (7): 119-123.
- [8] 张景望,吴建华,高洁,等. 长距离重力流输水系统水锤模拟及其防护研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 57-60.  
ZHANG Jingwang, WU Jianhua, GAO Jie, et al. Research on water hammer simulation and protection for long distance gravity flow water conveyance system [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 57-60.
- [9] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等. 重力流输水管路阀门调节与水锤控制分析[J]. 流体机械, 2020, 48(6):38-43,50.  
WANG Qiwu, LI Zhipeng, ZHU Cidong, et al. Analysis on valve regulation and water hammer control of gravity flow pipeline [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(6): 38-43,50.
- [10] 董茹,杨玉思,葛光环,等. 关阀程序对分支线重力流输水系统水锤升压的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(11): 50-54.  
DONG Ru, YANG Yusi, GE Guanghuan, et al. Effect of valve closure on rise in pressure in gravity water transmission pipeline with branches [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 50-54.
- [11] 结少鹏,张健,黎东洲,等. 多支队长距离重力流输水系统的水锤防护[J]. 人民黄河,2014,36(8):130-133.  
JIE Shaopeng, ZHANG Jian, LI Dongzhou, et al. Water hammer protection of long distance water gravitational transportation system with multiple branch [J]. Yellow River, 2014, 36(8): 130-133.

(责任编辑 周 蓓)