

长距离多支线有压输水系统起动水锤防护

蔡付林,樊子凯,周建旭,周 骏

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究同时包含重力流输水管线与泵站加压提水管线的长距离多支线有压输水系统开启运行时的水锤问题,基于瞬变流分析的特征线法建立了输水系统过渡过程计算的数学模型,结合实际工程计算了输水系统开启运行时调节阀与水泵及其出口阀不同的开启时间与控制策略对水锤的影响,并在此基础上提出了空气阀联合阀门开启的水锤防护方案。结果表明:采取提水泵站滞后调节阀开启运行,且各提水泵站相继开启的策略可有效改善输水系统沿线的内水压力分布;采用空气阀联合阀门开启的水锤防护方案可在不影响输水系统反应速度的情况下以较小尺寸的空气阀达到较好的水锤防护效果。

关键词:有压输水系统;水锤;瞬变流;数值模拟

中图分类号:TV134.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)04-0001-06

Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems//CAI Fulin, FAN Zikai, ZHOU Jianxu, ZHOU Jun (*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the water hammer problem of a long-distance multi-branch pressurized water conveyance system composed of gravity flow pipelines and pump pressurized pipelines during startup, a mathematical model for calculating the transient process of the water conveyance system was established based on the method of characteristics. Taking an actual project as an example, the impact of different opening time and control strategies of the regulating valve and the pump and its outlet valve on water hammer was calculated during the startup period of the water conveyance system. A water hammer protection scheme using air valves in combination with valve opening was proposed. The results show that the internal water pressure along the water conveyance system can be effectively improved by adopting the strategy that the opening of pump stations lags behind the start of regulating valves and each pump station is opened successively. The water hammer protection scheme using air valves in combination with valve opening can achieve better water hammer protection effect with a smaller size of air valves without affecting the response speed of the water conveyance system.

Key words: pressurized water conveyance system; water hammer; transient flow; numerical simulation

建设长距离输水工程对于满足社会生产需要,解决地区水资源分布不均具有重要意义^[1]。具有多支线的长距离有压输水系统由于不同支线之间地形的差别,往往同时建设有重力流输水管线与泵站加压提水管线,相比于单线程以及仅存在重力流的有压输水系统,这种输水系统的过渡过程更加复杂,更有可能出现危害系统安全的水锤问题。有压输水管道阀门的启闭以及水泵的启停,均会引起流速的变化而产生水锤^[2-5]。当管道中的内水压强增大到超过管道的承压能力时会导致爆管事故的发生;当管道中的内水压强减小到汽化压强以下时则会引起水柱分离,在水柱再弥合时会引起压强的急剧升高

而导致爆管^[6-8]。采用合理的控制策略及水锤防护措施对于输水系统的安全运行至关重要。

目前,学界对长距离有压输水系统的控制策略与水锤防护措施已进行了大量研究。赵红芳^[9]基于水锤基本理论与特征线方法,研究了泵出口阀不同的开启方式对起动水锤的影响,得到较合理的泵阀开启方式;黄时锋等^[10]通过建立输水系统水力过渡过程仿真计算数学模型,给出了水泵出口阀采用两段折线关闭规律时转折点开度和时间的选取方法。闫晓彤等^[11]发现采用优化干线泵后阀关闭规律和布设空气阀方案的联合防护措施,可以有效改善水泵断电时的水力特性。韩凯等^[12]对事故停泵

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379087)

作者简介:蔡付林(1963—),男,教授,博士,主要从事水电站和泵站水力学研究。E-mail:flenj@163.com

后重新启泵时间间隔等要素进行了敏感性分析,发现合理的启泵时间间隔有助于改善有压输水系统及其部件在水力过渡过程中的水力特性。目前长距离有压输水系统主要采用调压塔、空气罐、超压泄压阀等措施进行水锤防护^[13-17]。刘志勇等^[18]对空气阀的水锤防护特性进行了试验分析,发现合理的空气阀安装位置与进排气口口径可有效防止水柱分离再弥合所产生的水锤升压。目前,关于长距离输水系统水锤问题的研究多集中于停泵关阀的控制策略以及不同水锤防护措施的运用,对于多支线同时具有重力流输水管线与泵站加压提水管线的长距离有压输水系统开启运行时的水锤防护研究较少。

本文以特征线法为基础构建有压输水系统数学模型,对长距离多支线有压输水系统开启时的水力过渡过程进行计算。通过对比分析,研究不同阀门控制策略对水锤的影响,总结长距离有压输水系统启动水锤防护的优化原则,并进一步提出了空气阀联合阀门开启的水锤防护方案,可为相关工程的建设提供参考。

1 输水系统数学模型构建

1.1 有压管道过渡过程计算的特征线法

令 C^+ 、 C^- 为特征线,则有压管道系统水锤计算的特征相容方程为

$$C^+: H_{Pi} = C_P - B_P Q_{Pi} \quad (1)$$

$$C^-: H_{Pi} = C_M + B_M Q_{Pi} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } C_P &= H_{i-1} + BQ_{i-1} & B_P &= B + R|Q_{i-1}| \\ C_M &= H_{i+1} - BQ_{i+1} & B_M &= B + R|Q_{i+1}| \\ B &= v/gA & R &= f\Delta x/2gdA^2 \end{aligned}$$

式中: H_{Pi} 为节点 i 处测压管水头; Q_{Pi} 为测压管水头对应的流量; H_{i-1} 、 H_{i+1} 分别为节点 $i-1$ 和 $i+1$ 处的测压管水头; Q_{i-1} 、 Q_{i+1} 分别为节点 $i-1$ 和 $i+1$ 处的流量; v 、 g 、 d 、 A 、 f 分别为水锤波速、重力加速度、管道直径、管道面积和摩阻系数; Δx 为特征网格管段长度,满足库朗条件 $\Delta t = \Delta x/v$ 。

1.2 水泵边界条件

水泵机组计算断面如图 1 所示。

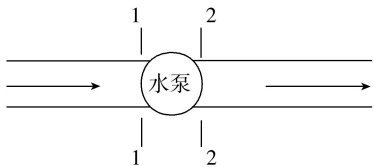


图 1 水泵机组计算断面

水泵出口阀水力平衡方程、水泵水力平衡方程和水泵机组运动方程分别为

$$H_{P3} = H_{P2} - (Q|Q|)/2C_q \quad (3)$$

$$H_{P2} = H_{P1} + H_r \quad (4)$$

$$T = -I(d\omega/dt) \quad (5)$$

式中: H_{P3} 为水泵出口阀下游侧断面测压管水头; H_{P1} 、 H_{P2} 分别为水泵机组计算断面 1 和断面 2 测压管水头; H_r 为水泵扬程; Q 为水泵出口阀流量; C_q 为水泵出口阀下游侧断面阀门阻力系数; T 为力矩; I 为转动惯量; ω 为角速度; t 为时间。

引入相对扬程 h 、相对流量 q 、相对转速 a 和相对力矩 β , 根据公式(3)(4)(5)整理得以下两方程:

$$C_P - C_M - qQ_r(B_P + B_M) + H_r(a^2 + q^2)W_H - q|q|\Delta H_0/\tau^2 = 0 \quad (6)$$

$$(a^2 + q^2)W_B + \beta_0 - C_T(a_0 - a) = 0 \quad (7)$$

其中 $W_H = h/(a^2 + q^2)$ $W_B = \beta/(a^2 + q^2)$

$$\beta_0 = T_0/T_r \quad C_T = 8In_r^2/365P_r\Delta t$$

式中: n_r 、 P_r 分别为水泵转速和功率; ΔH_0 、 τ 分别为控制阀的水头损失和相对开度; 下标 0、r 分别表示初始值和额定值。

式(6)与(7)采用牛顿-拉弗森(Newton-Raphson)迭代法求解,其中 W_H 和 W_B 依据水泵机组特性曲线采用线性插值方法得到。

1.3 调节阀边界条件

调节阀的水头-流量特性关系如下:

$$\Delta H = (K_r/2gA_v^2)Q^2 \quad (8)$$

式中: A_v 为调节阀全开时的过流面积; K_r 为调节阀不同开度下的压损系数,由调节阀的开度压损特性曲线插值得。

联立求解式(1)、式(2)和式(8)即可求得任一时刻不同调节阀开度下调节阀的过流量,以及调节阀上游侧和下游侧的压力水头。

1.4 空气阀边界条件

在建立空气阀数学模型时,为简化计算作出以下 4 个假设:①认为空气是理想气体且进出空气阀是等熵过程;②进入管内的气体迅速与水体达到热平衡,并最终与水体保持同温;③进入管内的空气滞留在空气阀附近;④水体表面高度基本保持不变^[19]。基于上述假设,可得到空气阀边界方程:

$$p[V_0 + 0.5\Delta t(Q_{0,out} - Q_{0,in} - Q_{t,in} + Q_{t,out})] = [m_0 + 0.5\Delta t(\dot{m}_0 + \dot{m}_t)]RT \quad (9)$$

式中: p 为空气阀压强; V_0 为初始时刻空穴的体积; $Q_{0,out}$ 、 $Q_{0,in}$ 分别为初始时刻流出和流入断面 $i-i$ 的流量; $Q_{t,out}$ 、 $Q_{t,in}$ 分别为时刻 t 流出和流入断面 $i-i$ 的流量; m_0 为初始时刻空穴中空气质量; $\dot{m}_0$ 为初始时刻流入或流出空穴的空气质量流量; $\dot{m}_t$ 为时刻 t 流入或流出空穴的空气质量流量。

方程(9)是以 p 为未知量的隐式方程,且空气

质量流量不是连续函数,形式较为复杂,采用牛顿-拉弗森迭代法可以较快地收敛得到满足精度要求的解。

2 实例计算

2.1 工程概况

某长距离有压输水工程由水库、输水工程两部分组成,其中输水工程包括供水工程和灌溉工程两部分。供水工程(E 支线)管长 8.69 km,设计流量 2.83 m³/s。灌溉工程由库内灌区工程和坝下灌区工程组成,库内灌溉工程由 5 号泵站支线与左右自流支管组成,管道总长 3.09 km,设计流量 0.38 m³/s;坝下灌溉工程由干管、两个重力流支线(D 支线、F 支线)与 4 个提水工程(1、2、3、4 号泵站支线)组成,其中 1 号和 2 号泵站支线末端调节池设有左右自流支管,4 号泵站支线设有自流支线(G 支线),坝下灌溉工程总长 41.81 km。其中,干管总长 30.51 km,渠首设计流量 2.01 m³/s;1、2、3、4 号泵站支线提水管道设计流量分别为 0.21、0.17、0.13、0.19 m³/s;D、F、G 支线设计流量分别为 0.18、0.51、0.33 m³/s。重力流管线的调节阀均布置于系统末端。该工程输水管网各泵站水泵参数见表 1,输水管网布置如图 2 所示。

表 1 水泵参数			
泵站名称	扬程/m	流量/(m ³ /h)	额定转速/(r/min)
1 号泵站	70~100(80)	527~263(415)	2960
2 号泵站	70~100(80)	527~263(415)	2960
3 号泵站	74~104(102)	399~199(255)	2960
4 号泵站	85~121(112)	576~288(375)	2960
5 号泵站	56.5~131.5(101)	780~300(540)	2900

注:括号中为额定点参数。

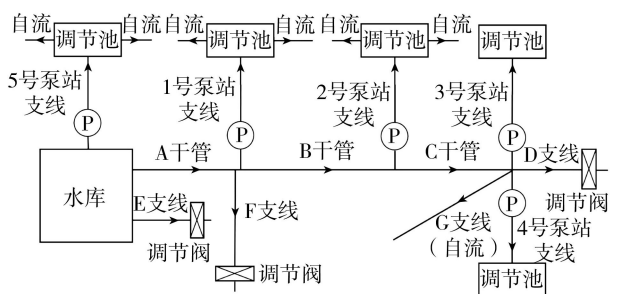


图 2 管网布置示意图

2.2 水锤防护原则

以输水系统开启运行作为水锤防护的分析工况。已知在重力流输水管线上,调节阀前管线越长,则关闭阀门所产生的水锤压力就越大,管线受水锤的影响也就越大。本工程输水管网重力流输水管线的调节阀布置在系统末端,管线的运行主要由调节阀控制。而需要使用泵站来加压的提水管线的运行则取决于水泵的启停运行控制与水泵出口阀的启闭操作。因此,本工程输水管网的过渡过程特性取决

于各调节阀、水泵及其出口阀的运行方式和系统的运行流量。水锤防护遵循原则是:不仅要防止不合理的防护措施导致发生水锤事故使工程遭到破坏,还要避免过度的防护导致浪费甚至影响系统的安全运行。

该管网为多支线有压输水系统,干管与各支线呈树状分布且阀门数量较多,重力流输水管线与泵站加压提水管线水力特性差异较大,开启运行时彼此的运行方式都会对沿线的水锤压力产生影响。因此,必须考虑调节阀与提水泵站相配合的开启运行方式。根据以往的工程经验,阀门的开启时间与多个阀门之间的控制策略是影响水锤的重要因素。因此,在优化输水系统开启方式时,应同时从开启时间与控制策略两方面考虑。针对调节阀,采用所有调节阀统一开启的方式进行控制;而对于提水泵站,考虑到调节阀开启所带来的压力波动,通过引入相对于调节阀的开启滞后时间以及各泵站之间相继开启的间隔时间来避免短时间内阀门集中开启带来的压力震荡。通过采用不同的阀门开启时间及滞后时间,计算分析不同方案下输水管网的最大及最小内水压力以确定最优的阀门控制策略。

在优化控制策略时,如果满足管网内水压力控制值要求所需的开启时间过长,为避免影响输水管网的反应速度对系统产生不利影响,考虑加入额外的水锤防护措施来进行联合防护以达到更好的水锤防护效果。本文采用空气阀作为额外的水锤防护措施。空气阀主要布置于管道的局部高点、长直管道、管道坡度变化的拐点、管道的变径处、管道阀门及其他附件处。由于管道充水、放空时空气阀的进排气性能对管道系统的安全影响极大,采用空气阀联合阀门开启的方案可在尽可能采用较小空气阀尺寸的前提下,选择空气阀的直径。

2.3 计算分析

2.3.1 稳态工况

针对长距离有压输水系统在运行时的稳态工况进行恒定流计算分析,计算所采用的输水管线全糙率取 0.012。计算结果如图 3 和图 4 所示,可见该输水系统在稳态工况下运行时,输水管网干管水头

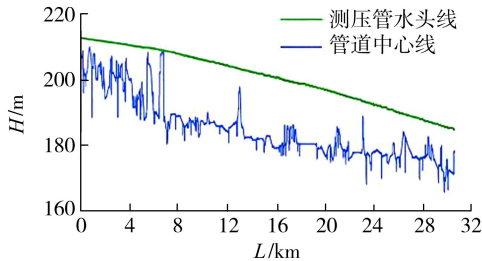


图 3 恒定流时干管沿线测压管水头分布

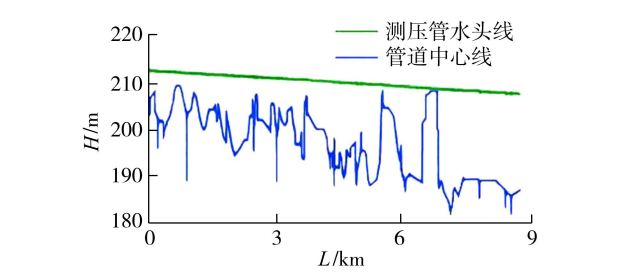


图4 恒定流时E支线沿线测压管水头分布

损失计算值为27.97 m,同设计值相近,各节点测压管水头满足设计要求,干管全线及各重力流支线均满足自流输水要求且有一定裕度。

2.3.2 不同控制策略计算分析

拟定了5种控制方案,对不同的阀门开启时间及不同阀门控制策略下输水管网内的内水压力(以压力水头表示)进行计算,控制方案和计算结果分别见表2和表3。

表2 起动水锤防护控制方案			
方案	t_v/s	t_p/s	控制策略
1	6	60	所有调节阀和提水泵站同时开启,不考虑水锤防护措施
2	30	60	所有调节阀和提水泵站同时开启,不考虑水锤防护措施
3	30	60	5号泵站和调节阀同时开启,其余提水泵站滞后调节阀30s开启运行,且各提水泵站间隔60s开启运行,不考虑水锤防护措施
4	30	60	5号泵站和调节阀同时开启,其余提水泵站滞后调节阀60s开启运行,且各提水泵站间隔60s开启运行,不考虑水锤防护措施
5	30	60	5号泵站和调节阀同时开启,其余提水泵站滞后调节阀120s开启运行,且各提水泵站间隔60s开启运行,不考虑水锤防护措施

注: t_v 为调节阀直线开启时间(全关至设计开度); t_p 为提水泵站水泵出口阀直线开启时间(全关至全开)。

表3 起动水锤防护优化计算结果				
方案	输水管网沿线内水压力			
	最大值/m	最大值位置	最小值/m	最小值位置
1	163.17	4号泵站支线	<-20.00	E支线
2	163.17	4号泵站支线	<-20.00	E支线
3	152.94	4号泵站支线	-11.23	E支线
4	152.86	4号泵站支线	-9.25	E支线
5	152.75	4号泵站支线	-9.25	E支线

从表3的计算结果可知,在调节阀和提水泵站同时开启时,管网沿线最大内水压力163.17 m,最小内水压力小于-20 m。系统负压远低于控制值。将调节阀的开启时间由6 s延长至30 s后,最大内水压力几乎不变,最小内水压力仍小于-20 m,仅延长调节阀开启时间无法有效控制内水压力。因此,有必要采用阀门相继开启的控制策略并设置合理的间隔时间。

设定各提水泵站开启的间隔时间为60 s固定值,保持调节阀开启时间为30 s不变,采用不同的水

泵机组滞后调节阀开启时间进行计算。方案3在引入了滞后时间与间隔时间后,在开启时间相同的情况下,管网沿线最大及最小内水压力明显优于方案2。最大内水压力为152.94 m,减小了10.23 m,最小内水压力为-11.23 m,增大超过8.77 m。提水泵站滞后调节阀开启运行,且各提水泵站相继开启可有效优化内水压力。

对比方案3、4、5,将滞后时间分别从30 s增加到60 s和从60 s增加到与120 s,管网沿线最大内水压力分别减小0.08 m与0.11 m,最小内水压力分别增大1.98 m与0.00 m。管网沿线最大内水压力随滞后时间的增加变化不大,而最小内水压力随滞后时间的增加逐渐增大。滞后时间为120 s和60 s时最小内水压力相同,此时管网最小内水压力为-9.25 m,仍可能出现水柱断裂现象,并不满足水锤防护的需求。可见滞后时间的增加对于最大内水压力影响较小,对于最小内水压力的影响也有限。若想通过改变控制策略以进一步改善输水管网沿线的内水压力分布,使最小内水压力水头大于或等于-2 m,则需要在此基础上延长阀门开启的间隔时间和减慢阀门开启速度,这会影响输水管网的反应速度,对于工程的安全高效运行是不利的。

2.3.3 空气阀联合阀门开启的水锤防护

在方案5的基础上加入空气阀作为额外的水锤防护措施,采用空气阀联合阀门开启的水锤防护方案进行计算分析。经分析拟定在输水管网沿线安装18处空气阀,具体安装位置及空气阀直径见表4,计算得到最大内水压力为152.13 m,位于4号泵站支线,最小内水压力为-1.91 m,位于E支线。可见输水管网沿线安装空气阀后,最大和最小内水压力相

表4 空气阀参数		
序号	位置	空气阀直径/cm
1	干管 6+612.93	20
2	干管 13+028.12	20
3	干管 16+706.03	20
4	干管 17+366.16	20
5	干管 20+966.25	20
6	干管 23+078.38	20
7	干管 25+559.68	20
8	干管 26+377.25	20
9	干管 28+408.38	20
10	干管 29+499.63	20
11	干管 29+920.11	20
12	干管 30+483.60	20
13	F支线 1+366.54	10
14	E支线 5+498.58	20
15	E支线 6+665.90	20
16	3号泵站 0+550.72	8
17	G支线 0+618.24	8
18	5号泵站 0+269.89	8

较于方案 5(未安装空气阀)增大明显,最大内水压力减小了 0.62 m,最小内水压力增大了 7.34 m,满足大于或等于-2 m 的控制值。空气阀对于输水系统最大内水压力影响较小,对最小内水压力增大较为明显。

图 5 为安装空气阀前后各支线调节阀上游测压管水头随时间变化曲线,图 6 为出现最小内水压力的 E 支线测压管最大和最小水头沿程分布(图中 L 为从管线入口到出口的距离)。安装空气阀后各调节阀上游测压管水头由于阀门相继开启所造成的波动明显减小且更快地趋于稳定。在出现最小内水压力的 E 支线沿线,安装空气阀前在管道局部高点处存在较大负压,安装空气阀后最小测压管水头线明显上升。最小测压管水头在安装空气阀处增大明

显,管道沿线仅在局部高点有两处出现较小负压区,输水系统负压增大明显。此外,安装空气阀后沿线测压管水头波动也更小。

综上所述,在输水系统沿线安装空气阀可在控制策略优化的基础上进一步降低输水管网开启时内水压力的波动并有效增大最小内水压力。采用空气阀联合阀门开启的水锤防护方案可以使用尺寸相对较小的空气阀,以较低的成本在不影响输水系统反应速度的情况下取得良好的水锤防护效果。

3 结 论

a. 针对包含了重力流输水管线与泵站加压提水管线的长距离多支线输水系统,采取提水泵站滞后调节阀开启运行,并且各提水泵站相继开启的控制策略可有效优化管网内水压力。随着滞后时间的增加,管网沿线最大内水压力变化较小,最小内水压力逐渐增大后保持不变。

b. 仅优化控制策略无法满足水锤防护要求时,加入空气阀作为联合水锤防护措施是合理有效的,空气阀对于输水系统负压增大较为明显。空气阀联合阀门开启的水锤防护方案相较于单一的水锤防护方案,减小了阀门开启方式对输水系统反应速度的影响,较小的空气阀尺寸可有效降低工程建设成本。

参考文献:

[1] 姬华生,周志彬,符必昌. 某长距离输水管道系统水力特性分析[J]. 灌溉排水学报,2018,37(增刊1):27-30. (JI Huasheng, ZHOU Zhibin, FU Bichang. Analysis of hydraulic characteristics of a long distance water transmission pipeline system[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2018,37(Sup1):27-30. (in Chinese))

[2] 丁梓恒,俞晓东,马世波,等. 泵站加压与重力自流联合供水工程的停泵水锤防护[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(4):338-344. (DING Ziheng, YU Xiaodong, MA Shibo, et al. Pump failure water hammer protection of pumping station pressurization and gravity combined water supply project[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(4): 338-344. (in Chinese))

[3] 蒋任飞,白丹,段彩霞,等. 泵站加压输水系统的优化[J]. 西安理工大学学报,2004,20(3):249-253. (JIANG Renfei, BAI Dan, DUAN Caixia, et al. Optimization of pressurized water delivery system in pumping station[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2004,20(3):249-253. (in Chinese))

[4] 刘奕朗,高学平,蒋琳琳. 压力流输水系统中缓闭式液控蝶阀关闭规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(6):107-110. (LIU Yilang, GAO Xueping, JIANG

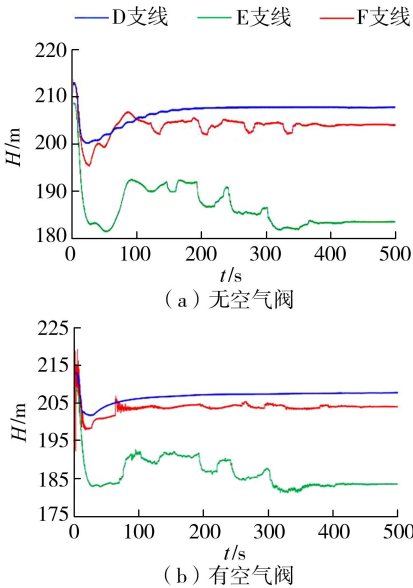


图 5 各支线调节阀上游测压管水头变化

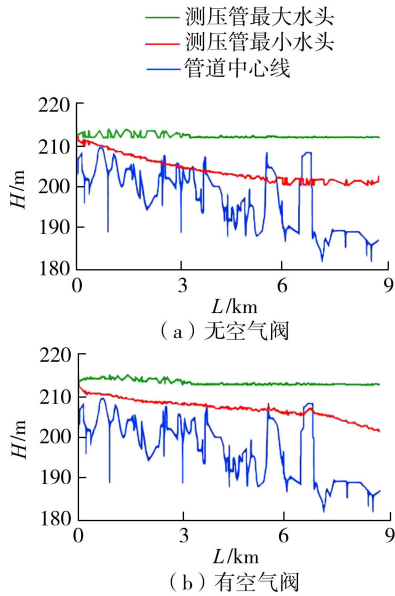


图 6 E 支线测压管水头沿程分布

- Linlin. Research on the closure law of hydraulic control slow closing butterfly valve in pressure flow water diversion system[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(6): 107-110. (in Chinese))
- [5] SHI Lin, ZHANG Jian, YU Xiaodong, 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.
- [6] 郑源, 刘德有. 供水管道系统水力过渡过程研究计算[J]. 水泵技术, 2000(5): 8-11. (ZHENG Yuan, LIU Deyou. Research on the hydraulic transition process of water supply piping system[J]. Pump Technology, 2000(5): 8-11. (in Chinese))
- [7] 刘竹青, 毕慧丽, 王福军. 空气阀在有压输水管路中的水锤防护作用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 333-337. (LIU Zhuqing, BI Huili, WANG Fujun. Effect of air valves on water hammer protection in pressure pipelines[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 333-337. (in Chinese))
- [8] MIAO Di, ZHANG Jian, CHEN Sheng, et al. Water hammer suppression for long distance water supply systems by combining the air vessel and valve[J]. Journal of Water Supply Research and Technology: AQUA, 2017, 66(5): 319-326.
- [9] 赵红芳. 不同泵阀开启方式下水泵启动水锤计算分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(6): 107-108. (ZHAO Hongfang. Calculation analysis of pump startup water hammer with different pump valve opening methods[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(6): 107-108. (in Chinese))
- [10] 黄时锋, 周文萍, 程佳秋. 输水系统水泵失电工况出口阀关闭规律的优选[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3): 56-60. (HUANG Shifeng, ZHOU Wenping, CHENG Jiaqiu. Optimization research on closure law of outlet valve under power failure condition in water conveyance system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3): 56-60. (in Chinese))
- [11] 闫晓彤, 杨春霞, 郑源. 含重力流支线的泵站加压供水系统水锤防护[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 371-378. (YAN Xiaotong, YANG Chunxia, ZHENG Yuan. Water hammer protection for pressurized water supply system with gravity branch[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 371-378. (in Chinese))
- [12] 韩凯, 丁法龙, 茅泽育. 长距离有压输水工程泵站水锤的数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 69-75. (HAN Kai, DING Falong, MAO Zeyu. Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 69-75. (in Chinese))
- [13] 杜畅, 刘喜元, 张健, 等. 泵后管线先降后升的长距离输水系统水锤防护[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(12): 1248-1253. (DU Chang, LIU Xiyuan, ZHANG Jian, et al. Long-distance water hammer protection of pipeline after pump being first lowered and then raised[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(12): 1248-1253. (in Chinese))
- [14] 李楠, 张健, 石林, 等. 空气罐与超压泄压阀联合水锤防护特性[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 254-260. (LI Nan, ZHANG Jian, SHI Lin, et al. Water hammer protection characteristic of combined air vessel and overpressure relief valve[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 254-260. (in Chinese))
- [15] 吴旭敏, 马子恒, 李高会, 等. 空气罐及空气阀联合水锤防护的应用[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 93-98. (WU Xumin, MA Ziheng, LI Gaohui, et al. Protective design of water hammer for pumping stations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 93-98. (in Chinese))
- [16] 梁兴, 李燕, 刘梅清, 等. 高扬程长爬坡泵系统水锤的防护[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(12): 1232-1236. (LIANG Xing, LI Yan, LIU Meiqing, et al. Water hammer protection of pump system with high head and long climb[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(12): 1232-1236. (in Chinese))
- [17] 梁圣辰, 张健, 贺蔚, 等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 170-175. (LIANG Shengchen, ZHANG Jian, HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 170-175. (in Chinese))
- [18] 刘志勇, 刘梅清. 空气阀水锤防护特性的主要影响参数分析及优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 85-89. (LIU Zhiyong, LIU Meiqing. Analysis and optimization of main influencing parameters for water hammer prevention characteristic of air valves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 85-89. (in Chinese))
- [19] 郑源, 张健. 水力机组过渡过程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.

(收稿日期: 2023-06-08 编辑: 熊水斌)