

## 输水管道水锤分析与防护技术

宋 芹<sup>1</sup>,赵星明<sup>1\*</sup>,艾典胜<sup>2</sup>

1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018

2. 泰安市建筑设计院有限责任公司, 山东 泰安 271000

**摘要:** 水锤会使输水管道中产生负压、汽化或液柱分离, 导致爆管或设备破坏。分析了水锤产生的原因, 根据特征线法计算简单管道的关阀水锤, 总结阐述水锤防护措施的应用, 可为消除水锤提供技术借鉴。

**关键词:** 水锤; 压力管道; 防护措施

**中图分类号:** TU991.39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2017)01-0084-04

## The Analysis and the Protection Technology of Water Hammer in Water Pipeline

SONG Qin<sup>1</sup>, ZHAO Xing-ming<sup>1\*</sup>, AI Dian-sheng<sup>2</sup>

1. College of Hydraulic and Civil Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Tai'an Architecture Design Institute Co., Ltd., Tai'an 271000, China

**Abstract:** The water hammer causes negative pressure, vaporization, liquid column separation and destroys pipelines and equipments. Analyzed reasons of the water hammer, calculated the water hammer of simple pipe according to the characteristic line method and summarized the application of water hammer protection measures, which would provide technical reference to eliminate water hammer in water pipelines.

**Keywords:** Water hammer; pressure pipeline; protection measures

在压力输水管道中, 水流是一种不稳定压力流, 若发生瞬变, 其流速、加速度、动水压强、密度等运动要素会随空间和时间变化。水泵突然断电或设备故障, 均会使流速发生剧烈变化, 产生急剧的压力交替, 并引起水锤现象。水锤的产生是由水流自身的惯性和可压缩性引起的, 若采取的防护措施不当, 会造成严重的水锤事故, 引起管道爆裂、水淹泵房, 甚至造成人身伤亡等更大的经济损失<sup>[1]</sup>。因此, 研究输水管道中水锤产生的原因, 并对其进行数学模拟和控制, 从而选择合理的防护措施, 是优化工程设计、确保工程安全运行的关键。

### 1 水锤的起因

水锤产生的内因是由于水具有惯性和可压缩性, 当流动状态发生瞬变会引发自身能量的转换和传递, 通过压缩形成高压将动能转换为势能, 并以波的形式在管道内传递, 经过产生、传播、反射、干涉和消失的物理过程, 使管道中的压力骤然升高或降低, 产生水锤。阀门的快速启闭和泵的动力故障等一些外部边界条件的变化就会引起管内压力变化, 产生水锤。在管道首次运行、检修放空或非满管情况下启动充水时, 阀门开启过快、管路排气不畅均会产生启动水锤; 关闭阀门过程中操作不当会产生关阀水锤<sup>[2]</sup>。当水泵机组突然断电时, 若泵站出水管不设止回阀, 停泵水锤一般不引起灾害, 但会使机组反转过快引起技术事故<sup>[3]</sup>; 为保护设备一般会在水泵出口处设置止回阀, 停泵时止回阀快速关闭产生的水锤使压力骤然升高, 可达到工作压力的 2~4 倍, 严重时会造成泵房淹没等重大危害。

### 2 水锤计算理论及模型

#### 2.1 水锤计算的特征线法

水锤分析计算方法主要有数解综合法、图解法和特征线法等, 其理论基础都是水锤基本微分方程式。其中特征线法借助于特征线, 将基本方程转化为便于计算机运行的有限差分方程, 使计算精度和计算效率得到提高, 可解决复杂管路系统和边界条件的水锤问题<sup>[4]</sup>。

**收稿日期:** 2016-10-16

**修回日期:** 2016-11-07

**作者简介:** 宋 芹(1991-),女,硕士研究生,研究方向为城市给排水管道系统优化. E-mail:1849553323@qq.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:xmzhao@sdau.edu.cn

水锤计算需对不同的边界条件（水池、泵、阀门及其它过流元件等）和管道参数构成的输水系统进行分析。先取一束流动隔离体分析得到水锤的基本方程，是由运动方程和连续方程组成的双曲型偏微分方程组，主要反映有压管道内非恒定流体流速和水头的变化规律。大多数的工程管道为刚性壁面材料（如金属、混凝土等），流速与波速相比，其影响可忽略不计<sup>[5]</sup>。若不考虑流速的影响，在特征值  $\frac{dx}{dt} = V \pm a$  的约束下，可将偏微分方程转化为常微分方程（式 1 和 3），式 2 和 4 为相容性方程：

$$C^+ \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{af}{2gD} V |V| = 0 & (1) \\ \frac{dx}{dt} = a & (2) \end{cases}$$

$$C^- \begin{cases} \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{af}{2gD} V |V| = 0 & (3) \\ \frac{dx}{dt} = -a & (4) \end{cases}$$

式中： $V$ 为流速， $H$ 为水头， $x$ 为沿管路的距离， $t$ 为沿暂态过程的历时。

将管道等分为  $N$  个长为  $\Delta x$  的步骤，以  $\Delta x$  和  $\Delta t$  为单元组成矩形网格，即可得到简化差分公式的矩形网格（如图 1 所示）。网格中的每一条对角线均为特征线，沿特征线即可求解管道的水锤暂态过程。对常微分方程进行差分，即得到简化后的有限差分方程（式 5 和 6）。

简化后的有限差分方程如下，

$$H_{pi} - H_{i-1} + B(Q_{pi} - Q_{i-1}) + R Q_{i-1} |Q_{i-1}| = 0 \quad (5)$$

$$H_{pi} - H_{i+1} - B(Q_{pi} - Q_{i+1}) - R Q_{i+1} |Q_{i+1}| = 0 \quad (6)$$

其中  $B = \frac{a}{gA}$ ,  $R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$

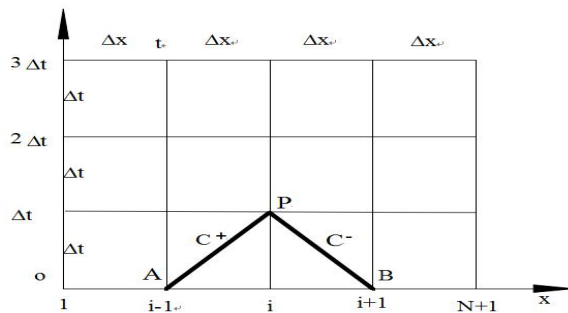


图 1 简化差分公式的矩形网格

Fig.1 Graphic grid of simplified difference formula

### 2.2 输水管道水锤计算分析

实际工程中的管路系统较为复杂，但是多条管道组成的供水系统中每一支管都是一个简单管路<sup>[6]</sup>，其计算方法基本相同。下面以单根管道的关阀水锤为例，分析因水锤引起的管道内水头和流量的变化。

由工程资料可知，管道长  $L=600$  m，管径  $D=0.6$  m，摩阻系数  $f=0.019$ ，波速  $a=1200$  m/s。管道上游水库的恒定水位  $H_0=289$  m，下游出口端基准高程作为 0，阀门装在管道下游出口端，全开时的过流面积乘以流量系数  $C_0=0.009$ ，部分开启时的流量系数乘以过流面积  $C=C_0\tau$ ， $\tau$ 为阀门的相对开启度， $\tau = (1 - \frac{t}{t_c})^{1.5}$ ，关阀总历时  $t_c=2.0$  s。

采用特征线法求解，将管道均分为 4 段 5 个节点，阀门前一个节点即第 4 节点在历时 8s 时的水头、流量计算数据如表 1，变化过程如图 2、3 所示。

表 1 第 4 节点流量水头变化  
Table 1 Flow and head changes of fourth node

时间 (s) Time	流量 (m³/s) Flow	水头 (mH <sub>2</sub> O) Head	时间 (s) Time	流量 (m³/s) Flow	水头 (mH <sub>2</sub> O) Head
0.0	0.671	284.902	4.5	0.014	239.377
0.5	0.539	342.186	5.0	0.021	294.503
1.0	0.264	389.939	5.5	-0.014	338.500
1.5	0.047	365.254	6.0	-0.021	283.460
2.0	-0.021	283.513	6.5	0.014	239.475
2.5	0.014	239.279	7.0	0.021	294.529
3.0	0.021	294.476	7.5	-0.014	338.403
3.5	-0.014	338.598	8.0	-0.021	283.434
4.0	-0.021	283.486			

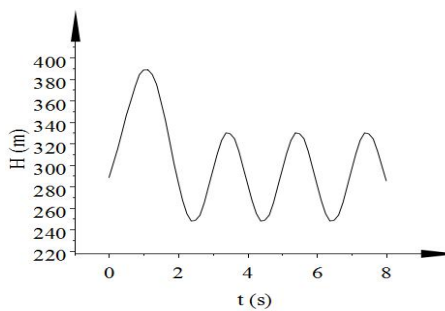


图 2 沿程水头波动

Fig.2 Fluctuating along the head

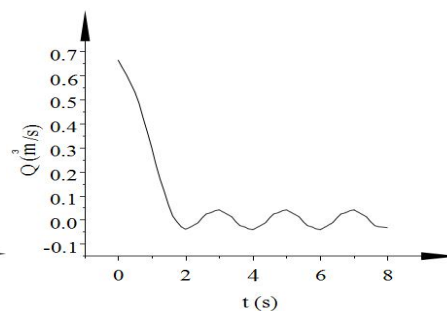


图 3 沿程流量波动

Fig.3 Fluctuation along the flow

关闭阀门后，在 1.125 s 时第 4 节点的管道内压力达到最大值 398.172 m，比稳态时管道压力升高 162 m；在 1.75 s 时，流量为-0.03 m³/s，此时管道内的水开始倒流。由此可知，当管道内发生水锤现象时，管内压力会在瞬时升高又迅速降低，甚至产生倒流。迅速产生的压差会使管道内产生波动并不断传递，形成水锤波。

### 3 水锤危害防护技术

水锤的产生多由降压开始，在输水工程中，主要从水锤波的产生和传播两个方面考虑，合理地选择并设置水锤防护装置，通过降低泵管系统中流速变梯度来消减或消除水锤。

#### 3.1 采用缓闭阀门控制水锤波的产生

水锤波的产生可通过调控阀门启闭时间和选择合理的阀门类型来控制。阀门启闭速度会影响流速的变化梯度<sup>[7]</sup>，而流速的急剧变化使管道产生大压差水锤波，水锤波在管道内快速传递产生水锤。阀门的启闭动作越慢，流速的变化梯度就越小，越不易产生水锤，因此合理调控阀门的启闭速度，可控制水锤的产生。当输水状态发生变化时，普通止回阀突然关闭使管道产生较大的水锤压力，若换用缓闭止回阀，则可以减小管道内的升压最大值，并避免机组反转。

但是缓闭阀的设计动作需要不断调试，对于不同的工况，需要通过详细的计算，得到阀门启闭时间的最优方案，否则不恰当的缓闭动作所产生的压力波动会比普通止回阀更为不利<sup>[8]</sup>。实际工程中缓闭阀的选择受到管径的影响<sup>[9]</sup>，当管径小于 400 mm 时，适合选择遥控浮球阀、减压阀、缓闭止回阀、泄压阀等水泵控制阀；当管径大于 1000 mm 时，选择液控蝶阀较为合适<sup>[10]</sup>。

另外，其它类型的阀门启闭时间也需控制，以控制水锤产生。

#### 3.2 合理选择装置抑制水锤波的传播

输水工程在正常运行时，受温度的影响，溶解于水中的空气游离出来聚于管道凸部上方形成空穴<sup>[11]</sup>，影响管内波速的传递，需及时排出；另外，管内压力随地势的起伏升高或降低，当压力降到

蒸气压力时会形成蒸气空穴,使管道的一些高点或折点附近发生水柱分离,严重时会造成断流弥合水锤。当管道内形成空穴,压力降低就会产生降压水锤波,此时可通过设置空气阀、空气罐和调压塔等调节措施进行补水、补气或缓冲来抑制降压波的传播。

空气阀设置在管道高点或折点,可给管道快速补充空气,将水锤限制在最低程;也可排出管道内初次冲水或运行过程中产生的空气,使水完全充满管道而没有空气滞留<sup>[12]</sup>。双向空气阀具有快速进气缓慢排气的功能,可在水锤降压波传播过程快速补气升压,并在升压波传播过程缓慢排气降压,排气时,通常压差控制在 1.5 m 水柱以下,排气风速控制在 45 m/s 以下,所以在输水管道中一般会结合水锤计算设置双向空气阀。注气式单向阀,可在管内压强低于大气压时注入空气防止真空产生负压;另一方面管内空气不可自由排出,回冲水流及升压波返回时会压缩空气,可以起到一定的缓冲作用,因此其对消减断流空腔弥合水锤的危害很有效。空气阀构造简单,不受安装条件限制,造价低廉,是水锤防护中常用的装置。

另一类调控装置是空气罐和调压塔,其作用原理相似,升压时压缩空气消能缓冲;降压时补水防负压<sup>[13]</sup>。区别在于空气罐内设置气囊,利用气囊的压缩与膨胀对管道进行注水和排气,而空气与水不直接接触,主要功能是减小水锤压力,多用于设备流量较小,扬程较高控制压力变化范围较广的情况。调压塔通过储存一定容积的水,利用压差向管道内注水,空气与水直接接触,主要功能是防止产生负压。双向调压塔不仅能向管道内注水防负压,还在管内压力较高时通过排水来缓冲泄压;单向调压塔顶部一般是封闭的,注水管上设有止回阀,使其只能向管道内注水<sup>[14]</sup>。单向调压塔的安装高度、水箱体积都较双向调压塔要小,经济上较为节省,更为实用。

## 4 结 语

水锤防护是一项系统工作,在理论研究中使用特征线法计算时,要合理的分析管道特性,选择适合的方法进行数值模拟。消除管道水锤的防护设备有很多,除从水锤波的产生和传播进行防护,还可以采用其他方式如增大水泵机组惯性、设置波动预止阀<sup>[15]</sup>等方式。在实际工程中必须依靠各种水锤防护措施互相协调、互相配合才能有效的对水锤进行消减防护。所以,应当认真分析研究输水管道特性,根据模拟理论,选择最符合实际情况的分析方法,并采取综合的防护措施,才能保证管道安全运行。

## 参考文献

- [1] 饶雪峰,刘海涛,苏 雷,等.长距离压力输水管道水锤防护设计[J].给水排水,2013,39(2):123-126
- [2] 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):107-108,118
- [3] 林 琦,刘志勇,刘梅清,等.长管道输水系统停泵水力过渡过程分析与防护[J].中国农村水利水电,2011(2):139-141
- [4] 向 蕾.管道工程水锤计算与分析[J].水利科技与经济,2015,21(6):31-33
- [5] 黄 伟,董 亮,闫宇翔,等.瞬变流中 MIAB 摩阻模型的数值模拟研究[J].人民黄河,2014,36(10):117-119
- [6] 荣 禹,张嘉军,张 乾.有压管道水锤数学模型分析和防护技术[J].中国给水排水,2012,28(12):18-20
- [7] 陈家远.水力过渡过程的数学模拟及控制[M].成都:四川大学出版社,2004:52-53
- [8] 杨祖强,罗 希,王文文,等.基于改进型多目标遗传算法的含气水锤防护方案优化研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):200-204
- [9] 葛光环,寇 坤.断流弥合水锤最优防护措施的比较与分析[J].给水排水,2015,31(1):52-60
- [10] Rezaei V, Calamak M, Bozkus Z. Performance of a Pumped Discharge Line with Combined Application of Protection Devices Against Water Hammer[J/OL]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016:1-8. doi:10.1007/s12205-016-0747-3
- [11] Triki A. Water-hammer control in pressurized-pipe flow using an in-line polymeric short-section[J]. Acta Mechanica, 2016,227(3):777-793
- [12] 梁其东.水锤理论模拟分析与防护技术应用研究[J].城镇供水,2014(5):89-92
- [13] 陈湧城.长距离输水工程的安全性及水锤危害防护技术[J].给水排水,2014,40(3):1-3
- [14] 金 锥,姜乃昌,汪兴华,等.停泵水锤及其防护[M].第二版.北京:中国建筑工业出版社,2008:262-280
- [15] 李建刚,蒋 劲,范 征,等.长距离输水管线压力波动预止阀开阀时间对突然停泵水锤低压的影响[J].水电能源科学,2014,32(10):155-158