

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222259

气垫调压室联合单向塔的停泵水锤防护研究

赵立杨¹, 冯梦雪², 李 昊³, 俞晓东¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510611; 3. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130021)

摘要: 针对某长距离、大流量、高扬程泵站加压供水工程, 对事故停泵进行模拟。结合工程地形特征, 提出采用气垫调压室和单向塔联合防护的方法, 并结合管道压力控制要求, 对泵后阀门关闭规律及调压室阻抗孔径进行敏感性分析。结果表明, 气垫调压室可有效防护停泵水锤及泵后阀快速关闭产生的关阀水锤, 单向塔解决了气垫调压室持续补水导致的局部高点低压问题, 保护了高点管段安全。联合防护方案可显著减小气垫调压室体积, 节约工程成本。另外, 泵后阀关闭规律及气垫调压室阻抗孔面积对管道的水锤压力影响较大, 关阀过快或阻抗孔口面积过大会导致管道正压超标; 关阀过慢或阻抗孔口面积过小会导致管道出现较大负压, 具体工程需结合过渡过程模拟进行优化, 对于本工程, 经过模拟优化, 阻抗孔口直径取 0.8 m, 泵后阀采用 5 s 直线关闭, 结果可满足调保计算要求。

关键词: 长距离供水工程; 过渡过程; 事故停泵; 水锤防护; 气垫调压室

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0081-04

1 工程概况

某长距离、大流量供水工程管线布置见图 1。取水口水位高程为 871 m, 输水管线在前 3/4 段总体较平缓, 局部多起伏, 高程爬升到 890 m; 后 1/4 段管线距离短, 爬升快, 总体较陡峭呈上升趋势, 直达出水口水位高程 934 m。输水线路为单管布置, 管道总长 20 026 m, 管材为 pccp, 设计承压标准为 100 m, 管径为 DN3000。水泵位于管线起点, 单泵设计流量为 3.34 m³/s, 3 台水泵并联

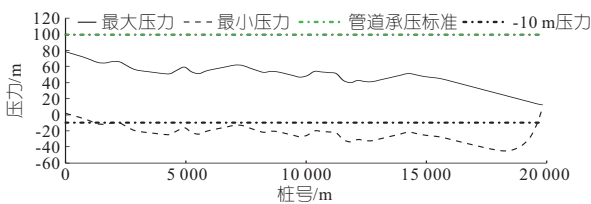


图 1 稳态运行时输水系统管中心线高程及测压管水头线

Fig. 1 Elevation of pipe center line and piezometric pipe head line of water conveyance system under steady state operation

输水, 设计总流量为 10 m³/s。全线管道总水头损失为 13.03 m, 水泵实际扬程为 76.03 m。全线管道最大内水压力为 78.08 m, 位于水泵出口处; 最小内水压力为 12.3 m, 位于管线末端。在输水系统无水锤防护措施, 水泵发生抽水断电的情况下, 全线管道的最大、最小内水压力包络线见图 2。全线管道的最大压力为 78.08 m, 位于水泵出口处; 由于水泵突然断电, 泵后瞬时降压达到 76 m, 其产生的降压波迅速向管道传播, 导致绝大部分管道压力降为负值, 全线压力最小值达

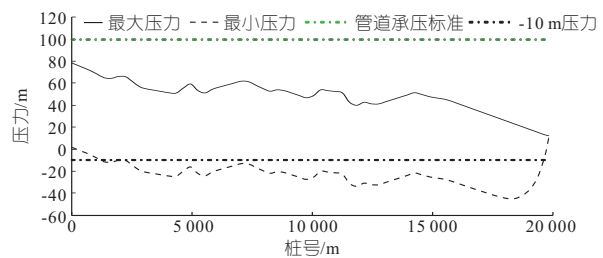


图 2 无防护断电管道最大与最小内水压力包络线
Fig. 2 Maximum and minimum internal water pressure envelopes of pipeline after pump failure without protective measure

收稿日期: 2022-10-28, 修回日期: 2022-12-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179062)

作者简介: 赵立杨(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为长距离、跨流域泵站输水系统的供水安全, E-mail: 154876848@qq.com

通讯作者: 俞晓东(1985-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水电站、泵站系统的过渡过程仿真与稳定性控制, 长距离、跨流域输配水系统水锤防护及优化调度, E-mail: yuxiaodong_851@hhu.edu.cn

到-44.51 m,位于桩号 18+140 处。若不设置水锤防护措施,系统将会出现液柱分离现象进而产生弥合水锤,造成管道破坏。故需要为输水系统设置合理的水锤防护措施,在保障管道安全的前提下,尽量节约工程成本。

目前应用于供水工程的水锤防护措施较多,常见的有单向塔、空气罐等^[1,2]。但随着工程规模的扩大,单一防护措施不仅增加工程成本,且防护效果减弱。目前,针对水锤联合防护和气垫调压室已进行了深入研究^[3,4],但将气垫调压室应用于供水工程水锤防护的案例较少,且系统参数对其过渡过程的影响规律还需研究。因此,本文仿真模拟了该工程事故停泵过渡过程。研究了气垫调压室联合防护方案的防护效果,以及关阀规律和阻抗孔径的影响。

2 数学模型

长距离供水工程过渡过程及防护措施相关数学模型已较为成熟,本文仅给出气垫调压室数学模型及求解方法,示意图见图 3。图 3 中 H_P 为气垫调压室底部压力, m; Q_1 、 Q_2 分别为气垫调压室上、下游侧的流量, m^3/s ; Q_{st} 为流进、流出气垫调压室的流量, m^3/s ; Z_{st} 、 h_c 分别为气垫调压室水位高程和中心高程, m; L 、 l_s 、 R 分别为气垫调压室总长度、水面线宽度和圆断面半径, m; P 为气垫调压室内气体绝对压力, Pa。

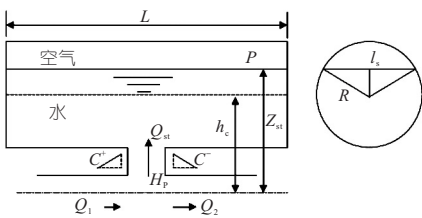


图 3 气垫调压室示意图

Fig. 3 Schematic diagram of air cushion surge chamber

压力管道瞬变流计算方程为:

$$\begin{cases} C^+ : H_P = C_P - B_P Q_1 \\ C^- : H_P = C_M + B_M Q_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_P 、 B_P 、 C_M 、 B_M 均为 $t - \Delta t$ 时刻的已知量, 其中 C_P 、 B_P 可由气垫调压室前节点 $t - \Delta t$ 时刻的压力和流量得到; C_M 、 B_M 可由气垫调压室后节点 $t - \Delta t$ 时刻的压力和流量得到。

气体状态方程为:

$$PV_{air}^n = C \quad (2)$$

式中, V_{air} 为气垫调压室内气体体积, m^3 ; n 为状态方程多方指数, 等温变化时取 1, 绝热变化时取

1.4; C 为与气垫调压室内气体初始状态有关的常数。

水面面积与气体体积变化方程为:

$$A_{st} = l_s L = 2L \sqrt{R^2 - (Z_{st} - h_c)^2} \quad (3)$$

$$V_{air} = L \left[\frac{l_s (h_c - Z_{st})}{2} + R^2 \arccos \frac{Z_{st} - h_c}{R} \right] \quad (4)$$

式中, A_{st} 为气垫调压室内水面面积, m^2 。

气垫调压室水位与流量关系为:

$$A_{st} dZ_{st} / dt = Q_{st} \quad (5)$$

水头平衡方程为:

$$H_P = Z_{st} + (P - P_0) / \gamma + k Q_{st} |Q_{st}| \quad (6)$$

式中, P_0 为当地大气压力, Pa; γ 为水体重量, N/m^3 ; k 为气垫调压室节点处的水力损失系数。

流量连续方程为:

$$Q_1 = Q_{st} + Q_2 \quad (7)$$

对式(5)、(6)积分并取二阶近似, 得:

$$\Delta Z = Z_{st} - Z_{st0} = [\Delta t (Q_{st} + Q_{st0})] / (2A_{st0}) \quad (8)$$

$$H_P = Z_{st} + (P - P_0) / \gamma + k Q_{st} |Q_{st0}| \quad (9)$$

式中, Z_{st0} 、 Q_{st0} 、 A_{st0} 均为 $t - \Delta t$ 时刻的已知量。

将式(4)代入式(2)得:

$$PA_{air}^n = P \{ l_s (h_c - Z_{st}) / 2 + R^2 \arccos [(Z_{st} - h_c) / R] \}^n = C_1 \quad (10)$$

其中

$$C_1 = C / L^n$$

式中, A_{air} 为气垫调压室圆断面气体面积, m^2 。

将式(10)化简得:

$$P \left[A_{air0}^n - \frac{n A_{air0}^{n-1} l_{s0} (Z_{st} - Z_{st0})}{A_{air0}} \right] = C_1 \quad (11)$$

$$P = C_2 + C_3 \Delta Z \quad (12)$$

其中 $C_2 = C_1 / A_{air0}^n$; $C_3 = n l_{s0} C_2 / A_{air0}$

联立式(1)、(7)~(12), 可得:

$$H_P = \frac{C_5 + C_4 (C_P / B_P + C_M / B_M)}{1 + C_4 (1 / B_P + 1 / B_M)} \quad (13)$$

其中 $C_4 = (1 + C_3) \Delta t / (2A_{st0}) + k |Q_{st0}|$

$C_5 = Z_{st0} + C_2 - P_0 / \gamma + (1 + C_3) \Delta t Q_{st0} / (2A_{st0})$

利用式(13)求得 H_P , 其他瞬变量也可求得。

3 防护方案研究

3.1 防护方案选择

由于该工程扬程高、流量大, 根据系统布置和恒定流计算, 若采用双向塔防护停泵水锤, 所需双向塔高接近 70 m, 工程成本过高且不易检修维护; 若采用空气罐防护方案, 所需空气罐总体积势必较大, 由于地形条件限制和场地空间有限, 空气罐不便于安装, 再加上造价过高且需要配套保温措施, 会使工程成本激增。而气垫调压室可设置

在泵后地下,与输水管道相接,易于安装和维修检测,且保温措施要求不高,在运行上较为经济和安全。本工程泵站后地下具备建设气垫调压室的条件,故拟采用以气垫调压室为主要防护措施的防护方案。

对气垫调压室独立防护方案(方案 A)与气垫调压室、单向塔联合防护方案(方案 B)进行过渡过程仿真模拟,得到的最小内水压力包络线见图 4。表 1 为气垫调压室参数,其中方案 B 单向塔桩号 11+840,底部高程 899.34 m,直径 3.5 m,高度 25 m,连接管直径 1.8 m,初始水位 924 m。两种方案均能满足调保计算要求。

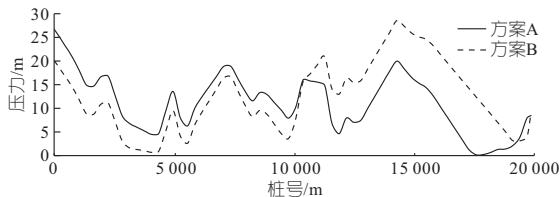


图 4 两方案最小内水压力包络线

Fig. 4 Envelopes of the minimum internal water pressure under the two schemes

表 1 两方案气垫调压室参数

Tab. 1 Parameters of air cushion surge chamber under two schemes

| 方案 | 水深 /m | 气室高度 /m | 长度 /m | 纵截面面积 /m ² | 底部安装高程 /m | 连接管直径 /m | 初始气体绝对压力 /m | 总容积 /m ³ |
|----|-------|---------|-------|-----------------------|-----------|----------|-------------|---------------------|
| A | 1.5 | 1.5 | 87 | 7 | 867.16 | 0.8 | 82.28 | 610 |
| B | 1.5 | 1.5 | 53 | 7 | 867.16 | 0.8 | 82.28 | 370 |

由图 4 可知,在管道前半段方案 A 的最小压力优于方案 B,经过单向塔后管段情况相反。这是因为管道前半段的最小压力由气垫调压室控制,方案 A 的气垫调压室体积相对较大,有更充足的水量对管道进行补水,能更好地抑制管道压力下降;管道后半段情况相反的主要原因有两方面:①管道高程偏高,当气垫调压室对这部分管道进行补水时,水流行进的动能逐渐减弱,防护效果渐渐变差;②方案 B 中单向塔与后半段管道更接近,当管道压力下降时能更迅速及时地对其进行补水防护,防护效果更好。方案 B 中单向塔的设置缩减了气垫调压室体积且能保证全线管道的安全,后续研究将以方案 B 为基础。

3.2 泵后阀门关闭规律研究

由于气垫调压室设置在泵站出口,一旦水泵发生抽水断电事故,气垫调压室内的高压会导致水体迅速向泵前倒流,为缩小气垫调压室体积及保护水泵安全,泵后阀应尽快关闭,但关闭过快又可能导致管道最大压力超过承压标准,需要进行敏感性分析确定相对较优关闭方案。

分别拟定泵后阀采用 1、5、10 s 一段直线关闭规律的方案 1、2、3 进行事故停泵过渡过程模拟,得到的管道最大、最小内水压力包络线见图 5,管线最小压力变化见图 6。

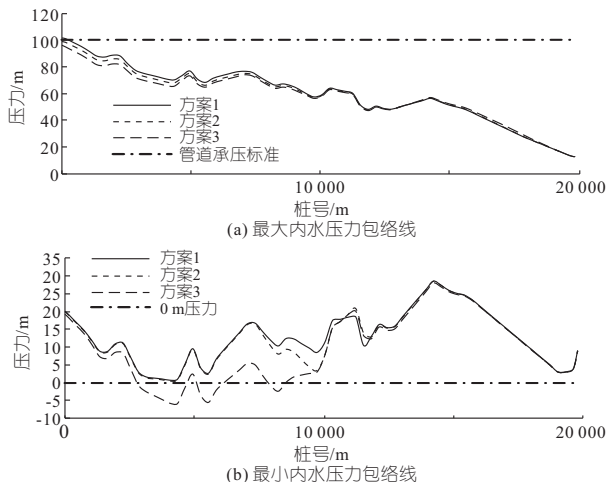


图 5 方案 1~3 最大、最小内水压力包络线

Fig. 5 Envelopes of the maximum and the minimum internal water pressure under three schemes

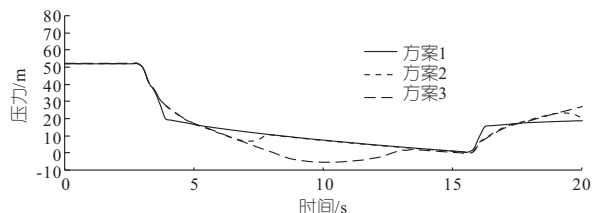


图 6 方案 1~3 最小压力变化过程(桩号 4+040)

Fig. 6 Changes of the minimum pressure under three schemes(4+040)

由图 5 可知,3 种方案的管道最大压力均位于水泵出口处,其中方案 1 的最大压力为 101.26 m,超过管道承压标准;方案 2、3 的最大压力分别为 98.74、96.11 m,满足管道承压要求。3 种方案的最大压力在近泵后管段稍有差别,这主要是泵后阀门关闭规律不同造成水体升压不同。3 种方案的管道最小压力均位于桩号 4+040 处,其中方案 1、2 的管道最小压力分别为 0.67、0.58 m,满足防护要求;方案 3 的管道最小压力为 -5.85 m,不满足防护要求。由图 6 可知,方案 3 最小压力出现在第一波压力下降最低点,这是气垫调压室补水不及时造成的;方案 1、2 最小压力出现在第二波压力下降最低点,这是气垫调压室水位下降造成的。方案 3 由于关阀时间长,气垫调压室内的高压导致水体迅速向泵前倒流,使其不能及时对泵后管道进行补水,导致管道出现负压。方案 1、2 中阀门较快关闭迫使气垫调压室内的水体及时向泵后管道补充,有效抑制了管道压力下降,保护了管道的安全。3 方案的最小压力均出现在气垫

调压室与单向塔之间管段,一方面是此处为管道局部高点且距气垫调压室较远,防护效果稍差;另一方面是单向塔对塔前防护距离很短的缘故。方案 2 不论是对管道升压水锤的防护还是抑制管道压力下降都能起到良好的防护作用。

3.3 气垫调压室阻抗孔径研究

气垫调压室通过阻抗孔口与管道相通,水体流经时会产生一定的水力损失。这对管道水锤压力会产生影响,需要进行敏感性分析确定对管道水锤防护效果较好的阻抗孔径。

分别拟定阻抗孔径为 0.6、0.8、1.0 m 的方案 4、5、6 进行事故停泵过渡过程模拟,气垫调压室参数见表 2,气垫调压室水位变化见图 7,管道最大、最小内水压力包络线见图 8。

表 2 三方案气垫调压室参数

Tab. 2 Parameters of air cushion surge chamber under three schemes

| 方案 | 水深 /m | 气室高度 /m | 长度 /m | 纵截面面积 /m ² | 底部安装高程 /m | 阻抗孔径 /m | 初始气体绝对压力 /m | 总容积 /m ³ |
|----|-------|---------|-------|-----------------------|-----------|---------|-------------|---------------------|
| 4 | 1.5 | 1.5 | 53 | 7 | 867.16 | 0.6 | 82.28 | 370 |
| 5 | 1.5 | 1.5 | 53 | 7 | 867.16 | 0.8 | 82.28 | 370 |
| 6 | 1.5 | 1.5 | 53 | 7 | 867.16 | 1.0 | 82.28 | 370 |

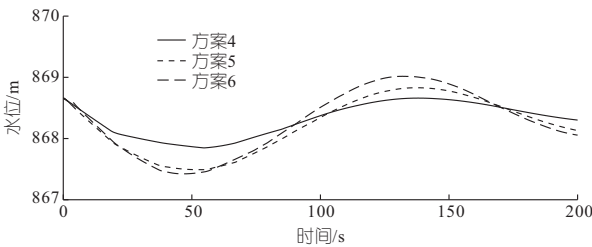
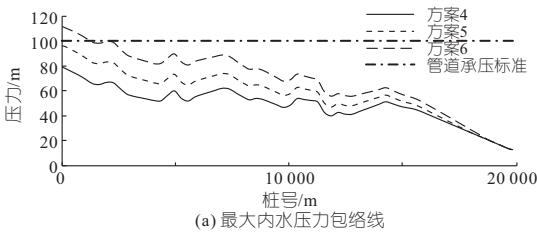
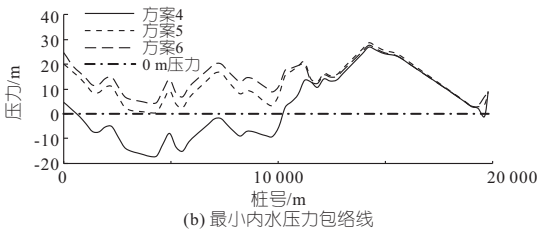


图 7 3 方案气垫调压室水位变化

Fig. 7 Water level change of air cushion surge chamber under three schemes



(a) 最大内水压力包络线



(b) 最小内水压力包络线

图 8 三方案最小内水压力包络线

Fig. 8 Envelopes of the minimum internal water pressure under three schemes

由图 7 可知,方案 4、5、6 的水位减幅逐渐增

大,其中方案 4 的最低水位最高。这是因为方案 4 的阻抗孔径较小,当系统发生事故停泵,气垫调压室内的高压水体通过阻抗孔时产生更多的水力损失,不能及时向后面管道补水,从而使管道压力瞬间下降过多出现严重负压。故阻抗孔径为 0.8 m 的气垫调压室方案更适合该工程的停泵水锤防护。由图 8 可知,3 种方案的管道最大压力均位于水泵出口处,其中方案 4、5 的最大压力分别为 79.38、98.74 m,满足管道承压标准;方案 6 的最大压力为 111.48 m,超过管道承压标准。由图 7 可知,方案 4、5、6 的水位增幅逐渐增大,其中方案 6 涌波水位最高。这是由于方案 6 的阻抗孔径大,管道内的水在涌入气垫调压室时水力损失小,涌入其中的水会更多,导致其上方气体被进一步压缩,近泵后管段的压力上升更多。方案 5、6 的管道最小压力分别为 0.58、3.12 m,分别位于桩号 4+040、19+040,满足负压防护要求;方案 4 的最小压力为-17.06 m,位于桩号 4+040,不满足防护要求。

4 结论

a. 采用气垫调压室和单向塔的联合防护方案来防护停泵水锤。气垫调压室可防护停泵水锤和关阀水锤,单向塔可防护其后管道的降压,缩小气垫调压室体积。

b. 气垫调压室内高压气体的存在使阀门的关闭规律和阻抗孔径的大小对管道压力有较大影响。关阀过快或孔径过大易使管道最大压力超标;关阀过慢或孔径过小则会导致管道出现负压。拟定方案时需要细化关阀规律和阻抗孔径,根据管道压力进行合理优化。

参考文献:

[1] 徐进,张健.长距离输水复杂管线下单向塔布置方案优化[J].水电能源科学,2009,27(5):139-141,135.
 [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].排灌机械工程专业学报,2022,40(4):338-344.
 [3] 唐榕联,张健.低扬程输水工程单向塔与高位水池的联合防护研究[J].水电能源科学,2021,39(8):124-127,70.
 [4] 胡去劣,吴时强.气垫调压室模型律和减压实验[J].水动力学研究与进展,2002,17(5):611-617.

- [5] 邱秀云,程艳,侯杰.植物“柔性坝”对水流影响的实验研究[J].水利水电技术,2003,34(9):62-65.
- [6] 杨庆楠,徐金忠,樊华,等.3种草本植物根系特征及与径流泥沙关系[J].中国水土保持,2021(9):47-52,9.
- [7] 闫静.含植物明渠水流阻力及紊流特性的试验研究[D].南京:河海大学,2008.
- [8] 沙玉清.泥沙运动的基本规律(一)物体的沉速[J].西北农学院学报,1956(3):1-15.
- [9] 唐洪武,吕升奇,龙涧川.刚性植物条件下静水中粗颗粒泥沙沉速研究[J].水利学报,2007,388(10):1214-1220.
- [10] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.
- [11] KRAMER H. Sand mixtures and sand movement in fluvial model[J]. Transactions of the American society of civil engineers, 1935, 100(1): 798-838.
- [12] TANG HONGWU, H WANG, D F LIANG, et al. Incipient motion of sediment in the presence of emergent rigid vegetation[J]. Journal of hydro-environment research, 2013, 7(3): 202-208.
- [13] 王浩.非淹没刚性植物水流条件下的泥沙起动研究[D].南京:河海大学,2013
- [14] UMESH C KOTHYARI, HARUYUKI HASHIMOTO, KENJIROU HAYASHI. Effect of tall vegetation on sediment transport by channel flows[J]. Journal of hydraulic research, 2009, 47(6):700-710.
- [15] GARDE R J, RAJU K G R. Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems [M]. Taylor & Francis, 2000.
- [16] STONE B M, SHEN H T. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness [J]. Journal of hydraulic engineering, 2002, 128(5): 500-506.
- [17] 魏龙,王义刚,黄惠明.推移层厚度研究综述[J].泥沙研究,2013(2):72-80.
- [18] 闫静,戴坤,唐洪武,等.植物条件下明渠紊流拟序结构的可视化研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):21-27.
- [19] DE SUTTER R, RUSHFORTH P, TAIT S, et al. Validation of existing bed load transport formulas using in-sewer sediment[J]. Journal of hydraulic engineering, 2003, 129(4):325-333.
- [20] 叶志恒,罗岸,付波,等.沙波与刚性非淹没植物复合床面曼宁系数特征研究[J].广东水利水电,2020(9):28-32.
- [21] 孟震,陈槐,李丹勋,等.推移质平衡输沙率公式研究[J].水利学报,2015,46(9):1080-1088.

Study on Sediment Transport Characteristics of Compound Bed Form Combined of Unsubmerged Rigid Vegetation and Sand Dunes

YE Zhi-heng¹, TANG Li-mo², NI Pei-tong¹, MIAO Qing¹

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The bedload sediment transport in the compound channel is affected by the presence of emergent rigid vegetation, and there were few studies available on this topic. The laboratory experiments and theoretical analysis were used to investigate the effect of emergent rigid vegetation in parallel arrangement on the threshold Shields number and the bedload transport intensity. The results show that the presence of emergent rigid vegetation in parallel arrangement increased the threshold Shields Number by 97.2%, and the bedload transport intensity reduced by more than 80%. The modified Engelund Formula that was applicable to the emergent rigid vegetation in parallel arrangement conditions was developed to calculate the bedload transport intensity. The formula was shown to have a high accuracy by applying it to the other studies.

Key words: sand ripple; unsubmerged rigid vegetation; composite bed surface; bedload sediment; transport characteristics

(上接第 84 页)

Research on Pump Failure Water Hammer Protection of Air Cushion Surge Chamber and One-way Surge Tank

ZHAO Li-yang¹, FENG Meng-xue², LI Hao³, YU Xiao-dong¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510611, China;

3. Jilin Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: For the pressurized water supply project of a long distance, large flow and high lift pumping station, the pump trip was simulated. Combined with the characteristics of the engineering terrain, the combined protection method of air-cushion surge chamber and one-way surge tank was proposed. And then the sensitivity analysis of the closing rule of the valve after the pump and the throttle orifice of the surge chamber was carried out according to the requirements of pipeline pressure control. The results show that the air cushion surge chamber could effectively protect the water hammer of the pump trip and the water hammer of valve shutdown caused by the rapid closure of the pump valve. The one-way surge tank solved the problem of local high pressure caused by the continuous water refill of the air cushion surge chamber, and protected the safety of the high point pipe section. The combined protection scheme could significantly reduce the volume of air cushion surge chamber and saved the engineering cost. In addition, the closing rule of the pump valve and the throttle orifice area of the air cushion surge chamber has a great impact on the water hammer pressure of the pipeline. Too fast valve closing or too large throttle orifice area will lead to the positive pressure of the pipeline exceeding the standard. Too slow valve closing or too small throttle orifice area will lead to large negative pressure in the pipeline. The specific project needs to be optimized in combination with transition process simulation. For this project, after simulation and optimization, the diameter of the throttle orifice was 0.8m, and the valve of the pump was closed by 5s straight line, and the results met the requirements of regulation guarantee calculation.

Key words: long distance water supply project; transition process; pump trip; water hammer protection; air cushion surge chamber