

高扬程长距离输水管线停泵水锤分析与防护

安荣云¹ 陈乙飞²

(1 上海理工大学城市建设与环境工程学院 上海 200090; 2 深圳市华力大机电技术有限公司 深圳 518034)

摘要: 借助 surge2008 软件, 结合某实际工程, 得出了停泵水锤综合解决措施。结果显示, 对于长距离加压输水管路系统而言, 止回阀的关阀方案、弥合水锤的针对性防护措施以及水击防护阀的功能和口径选择是非常重要的。

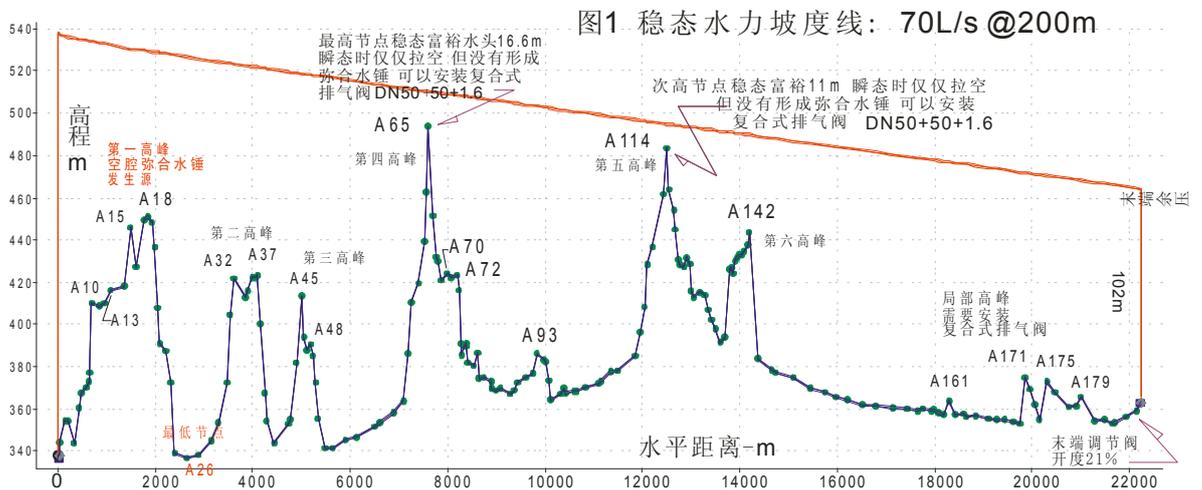
关键词: 水击泄放阀、断流弥合水锤; 数值模拟; 水锤防护; 注气微排阀

近年来, 长距离翻山越岭的输水项目越来越多。这些扬程高、距离长、管线多起伏的加压输水管线系统, 瞬态水力特性比较复杂, 泵站与管线的水锤综合防护是一个值得研究的重大课题。近几年, 笔者参与了多个此类工程的水锤分析和现场调试, 积累了一些经验和看法, 在此与大家共享。

1 工程概况

南方某长距离输水工程总设计流量 $0.07\text{m}^3/\text{s}$, 管长总长约 22km , 采用 DN300 的钢管进行单管输水, 水锤波速为 1171.6m/s 。水锤相 A65#节点发射 $\mu_1=7454\times 2/1171.6=12.72\text{S}$; 或 A114#节点发射 $\mu_2=12242\times 2/1171.6=20.9\text{S}$ 。吸水池水位 339m , 水泵 $200\text{m}@70\text{L/S}$ 一台; 最高节点 A065 高程 493m (7454m 处); 次高节点 A114 高程 483.8m (12242m 处)。止回阀处最大静压: $\Delta Z=493-340=153\text{m}$ 。末端节点 A186 标高 363m ; 末端水池水位 365.8m 。

由末端调节阀调节系统流量, 使水泵和管线工作在设计状态, 结果形成末端余压 102m , 需要减压调流, 还需要分析计算末端调节阀的开阀水锤和关阀水锤, 以及可能的调节水锤, 限于篇幅, 本文不讨论这个也需要认真对待的比较复杂的技术问题。经调节后管路系统的稳态水力坡度线如图 1 所示。流速 $V=0.9\text{m/s}$, 水力坡度 $i=3.05\text{‰}$ 。请注意图 1 所示的节点编号。



2. 瞬态水力分析

2.1 数值计算求解方法

水锤模拟计算软件为美国 KENTUCKY 大学的 surge2008, 水锤波的特征方程为基于弹性水柱理论的两个基本方程:

$$(1) \text{ 连续方程 } \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA_L} \frac{\partial Q}{\partial x}$$

$$(2) \text{ 动量方程 } \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{gA_L} \frac{\partial Q}{\partial t} + f(Q)$$

两个非线性偏微分方程的数值求解方法为拉格朗日“波特特性法”（Wave Characteristic Method，简称 WCM），以瞬态管流源于管道系统水力扰动中的压力波的发生和传播这一物理概念为理论基础，通过追踪水锤波的发生、传播、反射和干涉，计算各节点不同时间段的瞬态压力值。在 Journal AWWA 上发表的多篇论文中，Wood 教授对波特特性法作了详细的论述，并通过数值模拟及工程验证对该方法与特征线法做了大量对比。结果显示，“波特特性法”与特征线法具有同等的准确性，两者的计算结果完全吻合。鉴于波特特性法的特殊计算理论基础，它又具有特征线法所不具备的高效计算速度。

2.2 水锤分析计算

停泵水锤的数值计算针对的是事故断电水泵开阀停车这种最不利的工况。在停泵水力过渡过程中，泵后止回阀的关闭程序对泵站管路系统的瞬变特性具有十分重要的影响（但也有例外，即影响不敏感），关闭的快慢与管线压力的变化、水泵倒流和倒转速有直接的关系，我们选择下面三种止回阀的关闭方案进行试算：

A: 3S 快闭 95%，26S($\approx 2\mu_1$)缓闭 5%，偏向于快闭的二阶段关闭方案；

B: 3S 快闭 95%，10S($\approx 0.8\mu_1$)缓闭 5%，接近于投产后的实际运行工况；

C: 5S 快闭 90%，64S($\approx 5\mu_1$)缓闭 10%，偏向于缓闭的二阶段关闭方案；

经计算，停泵后，次高节点和最高节点很快出现水柱分离现象，且分离水柱不具备弥合的条件，故先在这两个节点分别安装 DN50+50+1.6mm 三功能复合式排气阀，消除真空，再进行各方案试算。

(1) 止回阀关闭方案 A

图 2 为事故停泵后止回阀节点的水击压力历时曲线，图 3 则为整条管线的水击包络线。可知，第 63 秒时，止回阀出口压力达到最大值 317m，升压比 58.5%。

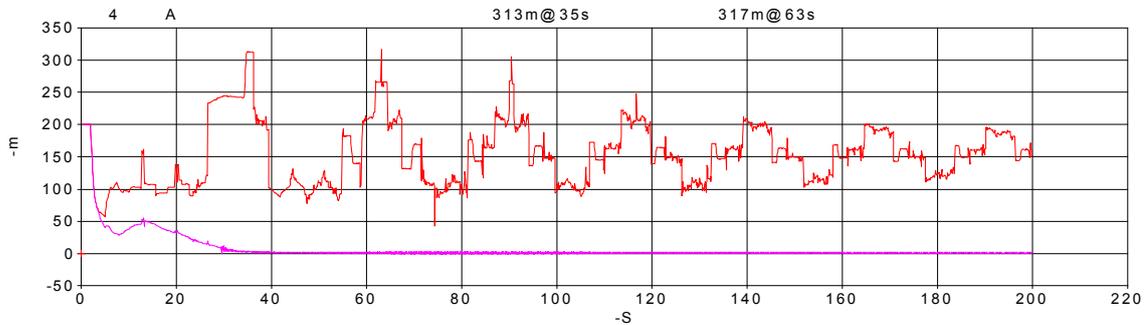
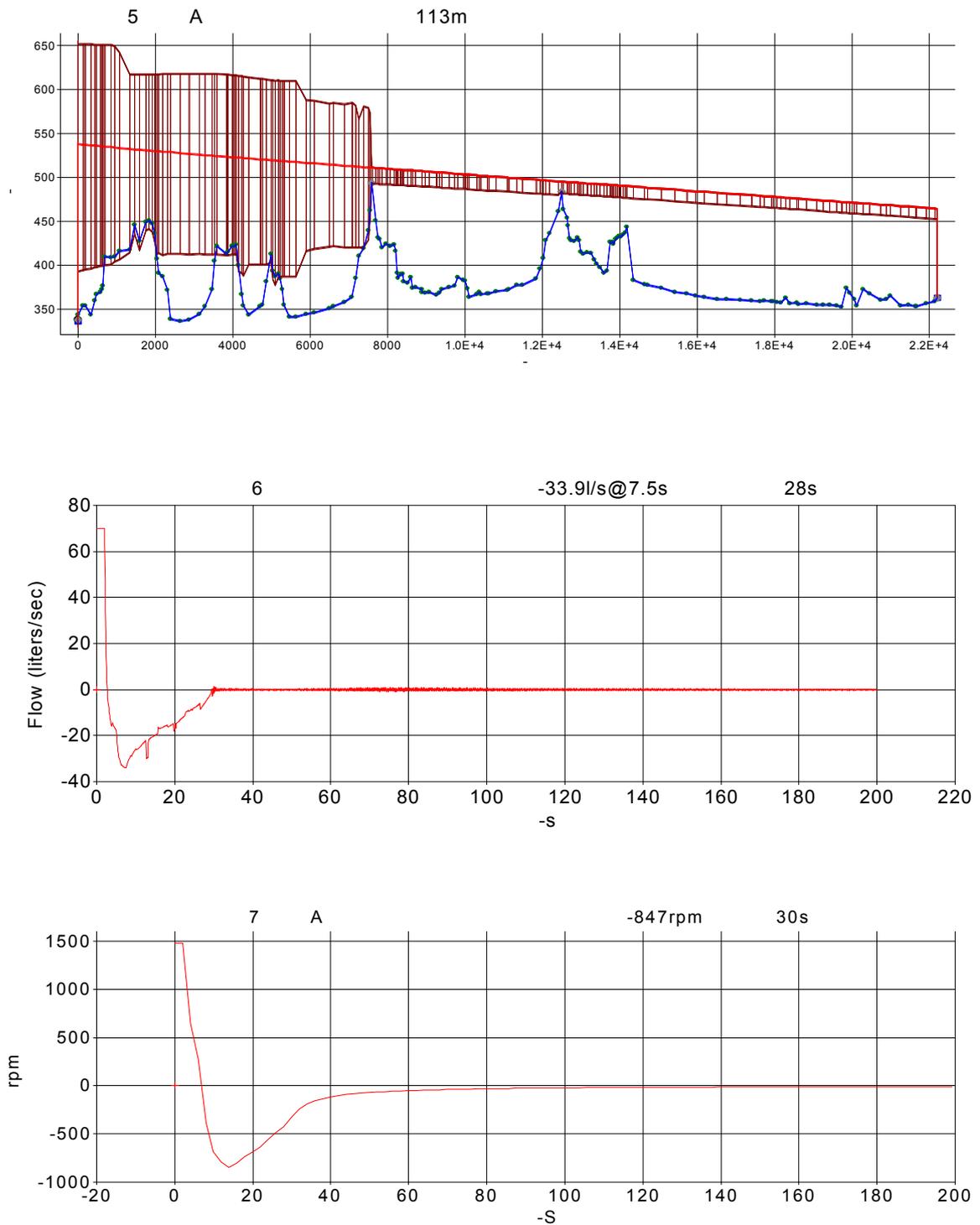


图 3 方案 A 整条管线的水击包络线



(2) 止回阀关闭方案 B: 3S 快闭 95%, 10S 缓闭 5%

该关闭程序与投产后的实际运行工况相近。水力式水泵控制阀二阶段关闭方案的选择余地不大，它受到下列因素的约束：启泵慢开和停泵缓闭，这二个因素有时候相互制约，不能随意调节。事故断电，管线上游三个局部高峰节点和止回阀节点水击压力历时曲线分别如图 6-9 所示，局部管线水击包络线图见图 10。可以判断，断流空腔弥合水锤的发生源是节点 A15 和 A18，而不是泵站止回阀下游。由止回阀节点的水击压力历时曲线图 9 可知，停泵所产生的正压水锤波就是图中的第一个尖波，但强度只有 184.7m，(低于稳态压力 200m)，发生时间为 12.37s，接近于一个水锤相 ($\mu_1 = 7454 * 2 / 1171.6 = 12.72S$)。依次推知，止回阀下游后期发生的水锤升压都是由 A15-18 节点等其他节点所产生的非常水锤反射而来的。

图 6 方案 B 局部高点 A15 水击压力历时曲线

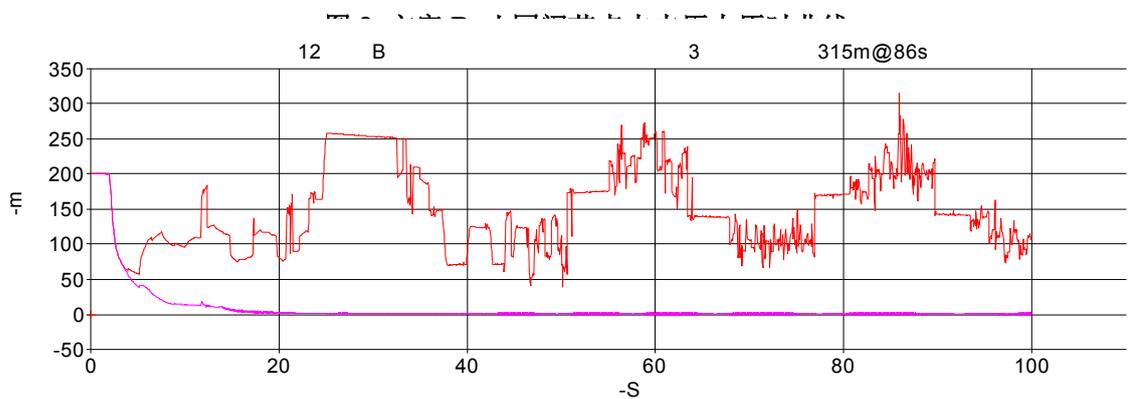
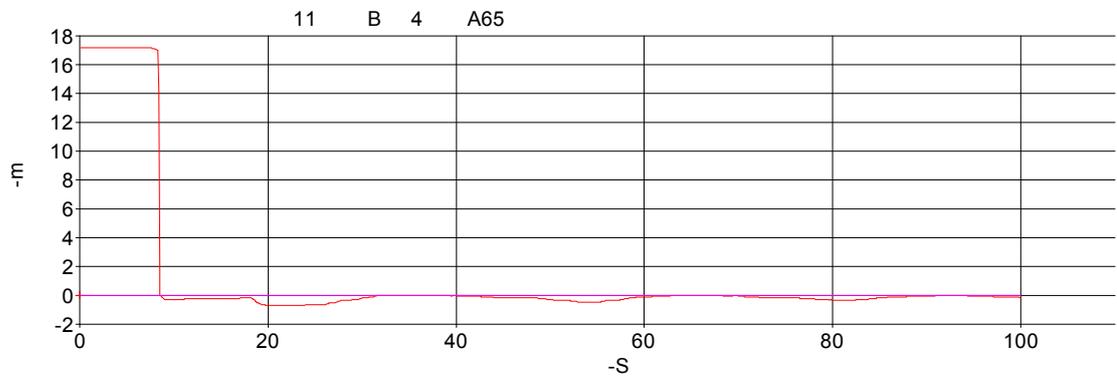
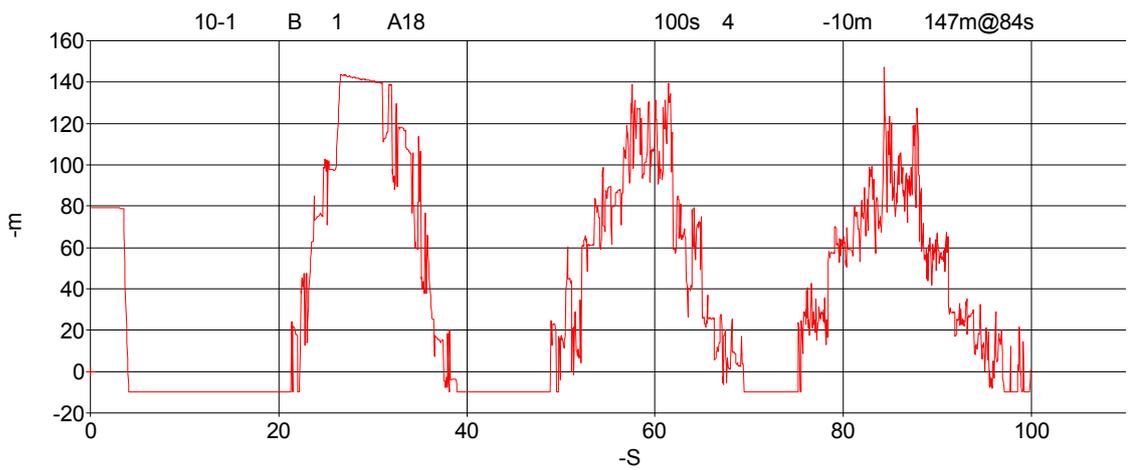
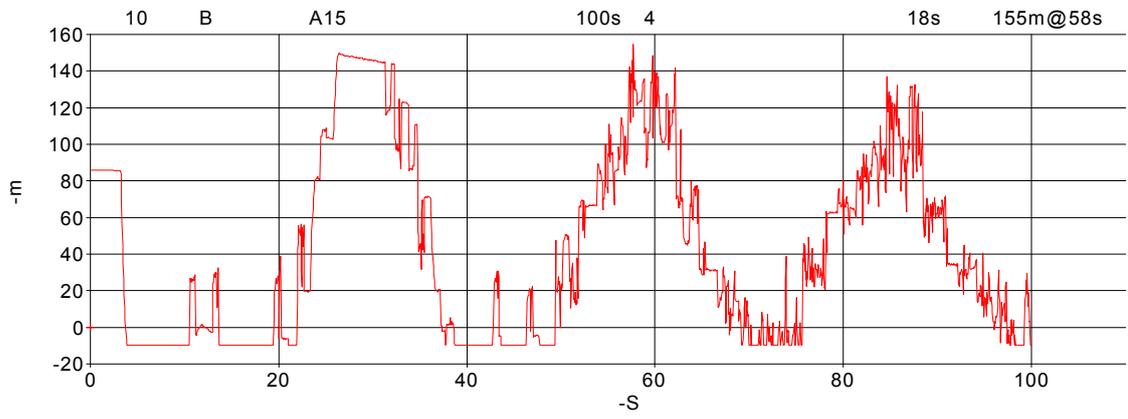
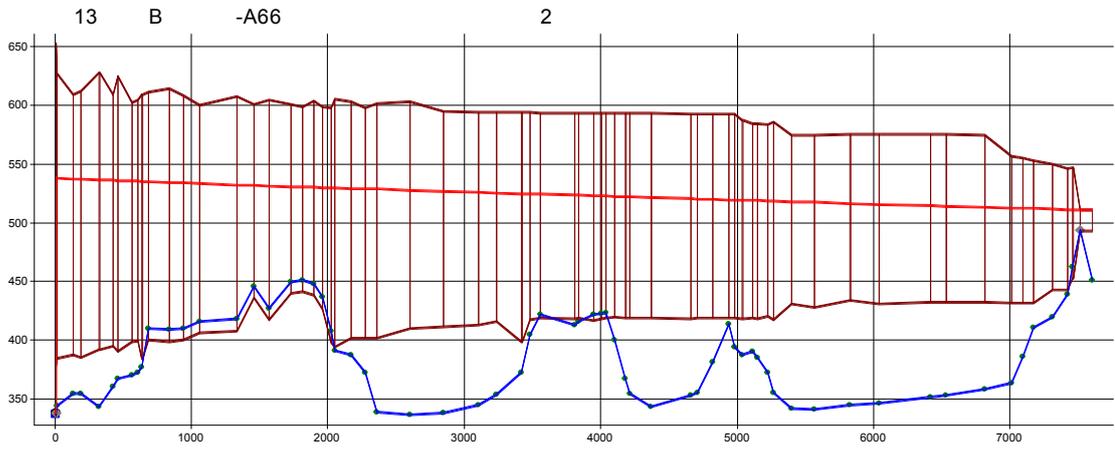


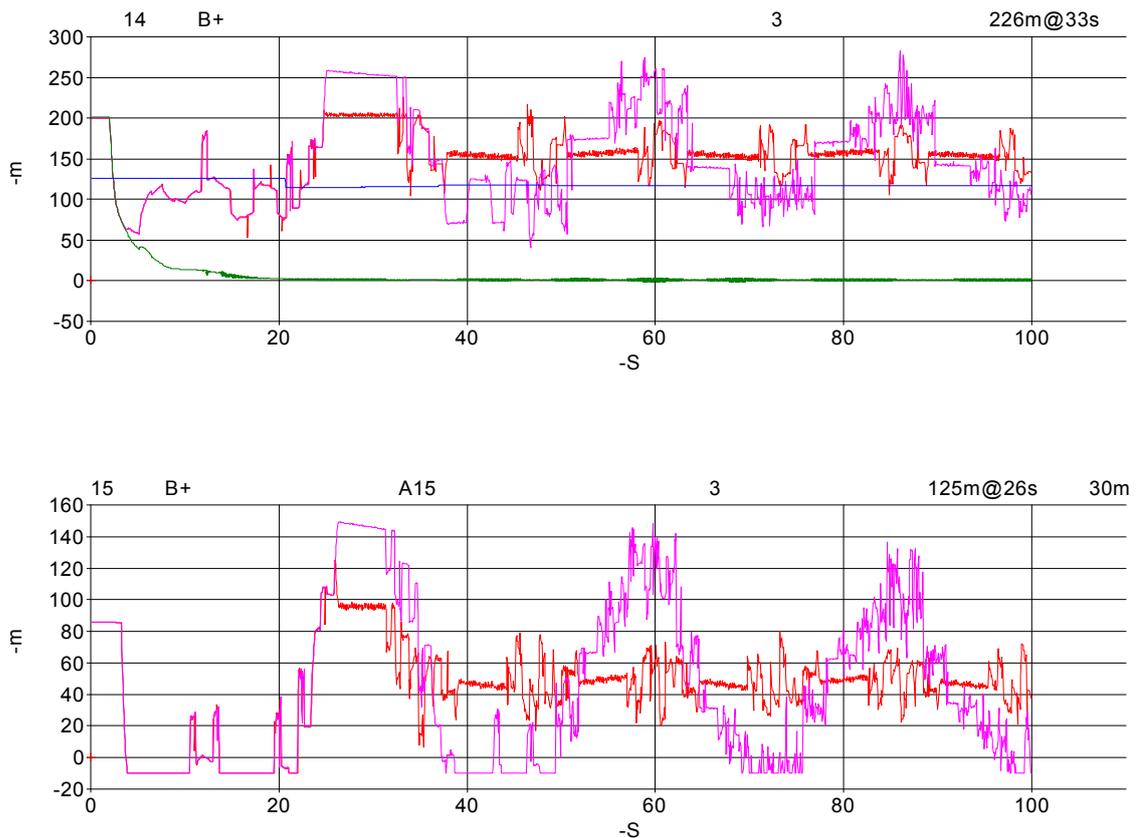
图 10 方案 B 吸水池至 A-66 节点之间的局部管线的水击包络线



2.3 泵站水锤防护措施

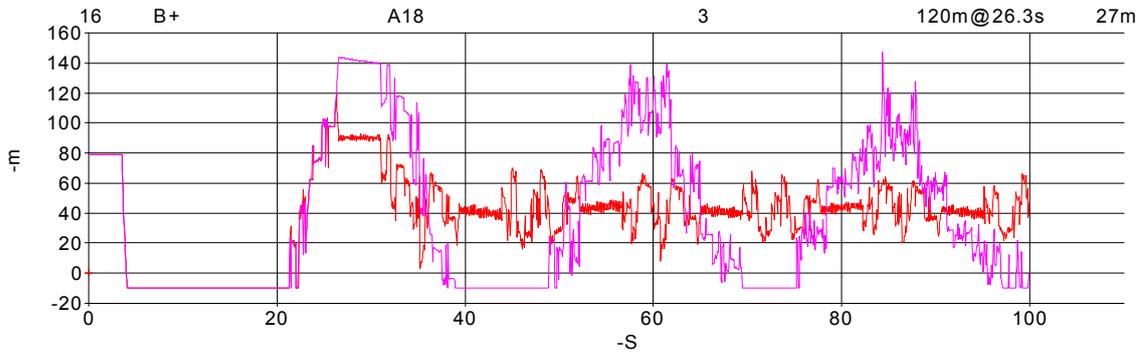
针对这个实际的关阀方案，采取如下停泵水锤防护措施：在泵站止回阀下游安装 DN100 的水击泄放阀，设定开启压力 210m(比稳态压力高 10m 或者 5%~10%，若有多个水击阀并联，其设定压力可以相差 2~3m 递增)，关阀压力设定在 205m，响应高压水锤快速开启所需时间 0.5s(不能太慢，否则无法响应以声速传播的水锤高压，跟泄压阀不同)，关阀时间 10s(不能太快，否则会产生自身关阀水锤，尤其是可能引导大流量倒流的水击预防阀更不能快闭)。其消锤效果见下面图 11 中的红色线，粉红色线是没有安装水击泄放阀之前的水击压力历时曲线，高压水锤波被削减了几十米。另外两个关键节点 A15 和 A18 的消锤效果见图 12 和图 13。

图 11 方案 B 安装水击泄放阀前后 13 号泵站水击压力比较

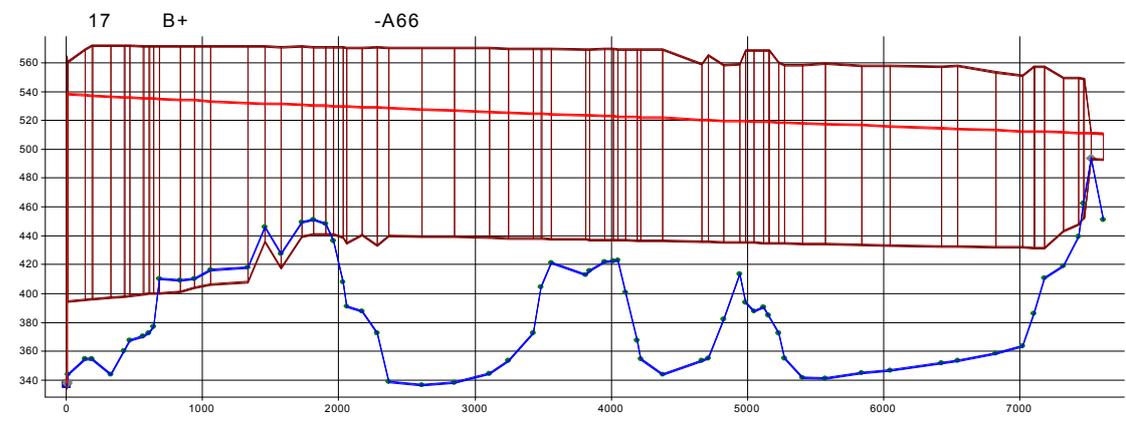


由图 12 和图 13 可知，泵站的水击泄放阀对远在 1500~1800m 之外的二个 A15-18 节点产生的断流弥合水锤效果甚微，既不能大幅削减弥合升压，更不能消除负压。对付这种断流弥合水锤的最好办法应该是就地安装“特效的”“注气微排阀”。

图 13 方案 B 安装水击泄放阀前后 A18 节点水击压力比较

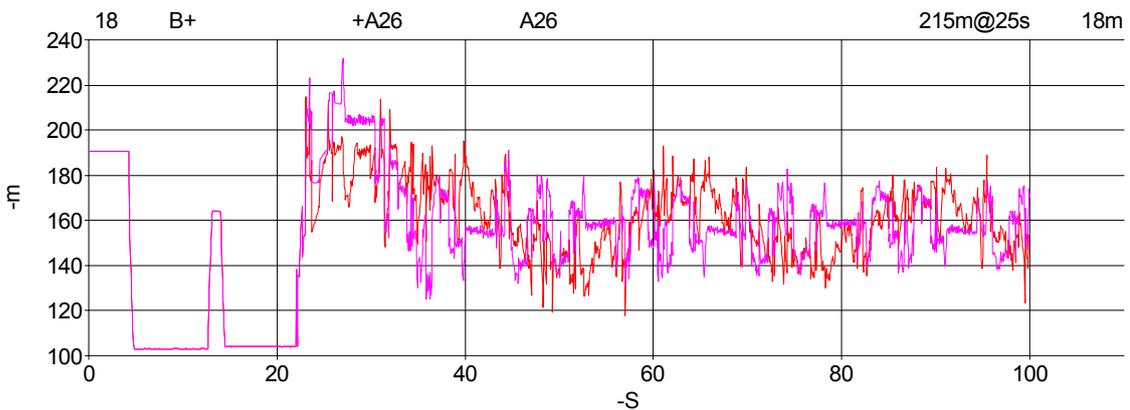


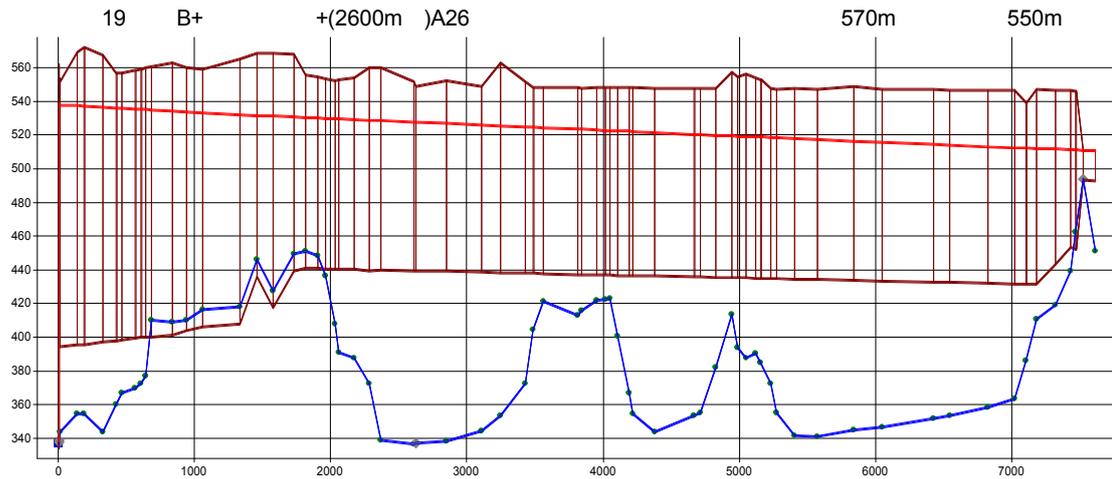
经泵站水击泄放阀消锤后，上游吸水池至 A66 节点管段水击包络线如图 14 所示，比较图 10 和 14 可以看出：最高水击压力由原来的 655m 被削减为大约 570m，整条“最高压力线”下移了几十米。



2.4 管线沿线水锤防护措施

由于 2350~3000m 之间的管段位置很低，稳态压力仍然偏高，可以在个别节点，如最低节点 A26（图 14 中约 2600m 处）安装一台 DN50~100 的水击泄放阀，将会在 A26 附近形成一个泄水低压漏斗，局部降压，保护局部管线。但是它的保护范围是有限的，前后大约几百至一公里，见图 15 和图 16。原来 233m 的高压被削减为 215m，也仅削减 18m，而且对负压无效。图 14 中 2000~4500m 之间的原来高达 570m 的高压被削减为如图 16 所示的 550m 左右，降压约 20m，还具有效果的。





2.5 水击预防阀与水击泄放阀比较

更换泵站的水击泄放阀为同样口径 DN100 的水击预防阀，即具有感应低压提前开启预防水锤功能的双导阀水力式水击泄放阀-Surge Anticipator 或者 Anticipator Valve。其设定条件如下：低压提前开启设定压力：100m-相当于稳态压力 200m 的 0.5 倍；快速响应低压条件开启时间：0.5s；等待高压波返回维持开启时间：23s(由图 11 可知，最高的第一个高压波上升沿距离停泵时间大约是 23s，这个维持开启时间既不能太长-以免泄水过多反而引导水锤或加重水锤，也不能太短-以免高压波返回时预防阀已经关闭，失去预防功能，更重要的是，这个维持时间不能没有控制手段而任由系统的水力条件自行决定，不能主动而且可控的自动关闭的提前开启可能会导致相反的效果)；高压开启设定压力：210m（同水击泄放阀设定值）。其消锤效果如图 17 所示：因为 23s 持续+10s 关阀共 33s 的长时间泄水，DN100 口径偏大，泄水过多，造成管线失压，并且引导 A15-18 节点发生更严重的拉空弥合水锤（见图 18-19）。

由图 17 看出：水击泄放阀仅开启一次(粉红色线)，把水击高压控制在 210m 以内后就稳定在止回阀节点的静态压力 493-340=153m 附近，而水击预防阀却在 300s 的模拟时间内反复开启了 9 次，造成泄水过多(预防阀的特点是一旦开启就完全开启达到最大泄流能力，而泄放阀则是调节型开启，随水击压力大小自行调节开启度)。预防阀反复开启的原因是：(参见)图 9 中 100s 内的 3 个高压水击波都有下降沿，这些下降沿都达到 100m 的预防阀低压设定值，导致低压导阀反复动作。工程现场的实际情况的录像基本证实这个模拟结果。

图 17 水击泄放阀和水击预防阀时止回阀节点上压力比较

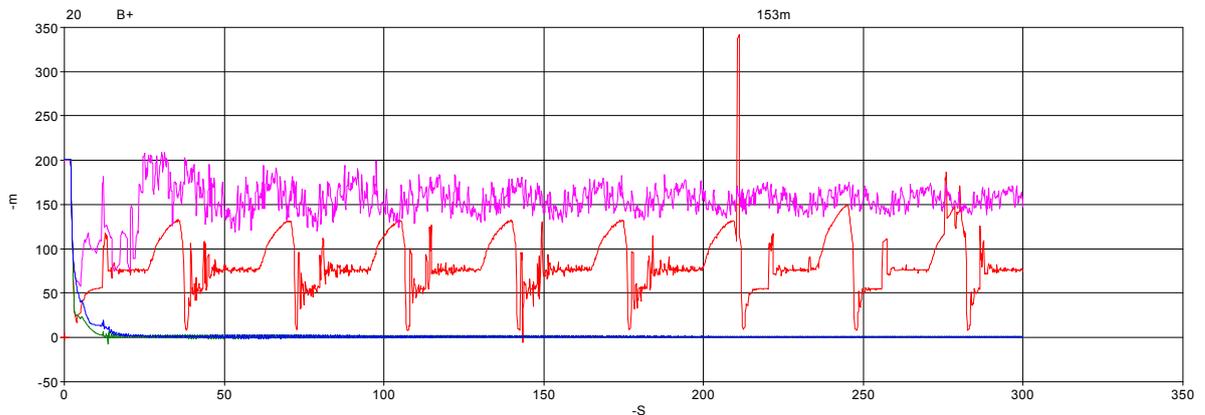


图 18 六安 B 空桩水土质检测及 A18 井水土质检测上游管处水土质检测

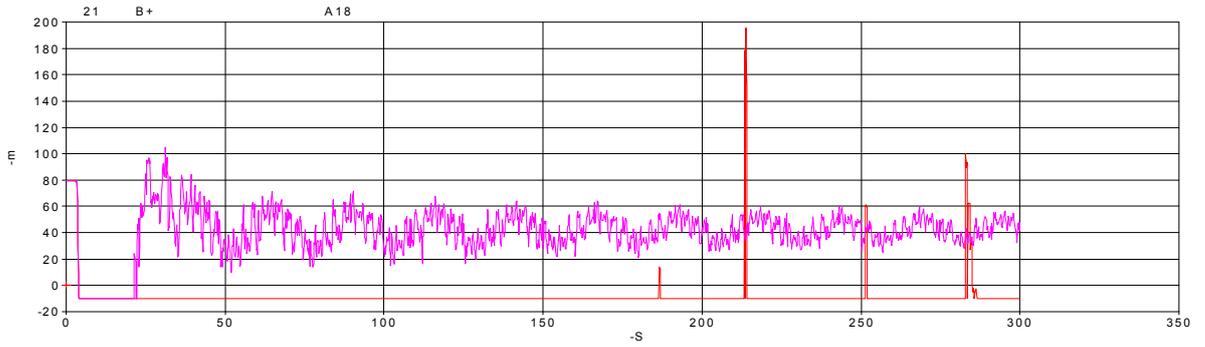


图 19 六安 B 空桩水土质检测及 A15 井水土质检测上游管处水土质检测

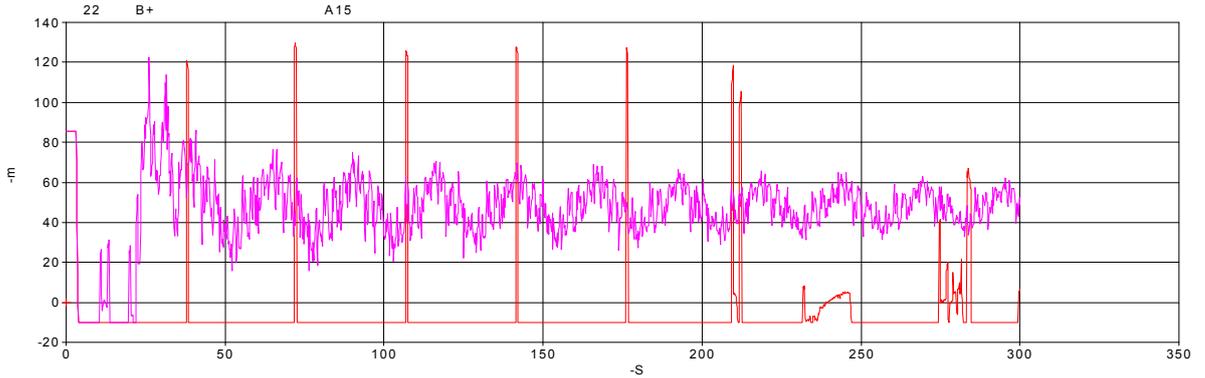


图 20 六安 B 空桩水土质检测及 A26 井水土质检测上游管处水土质检测

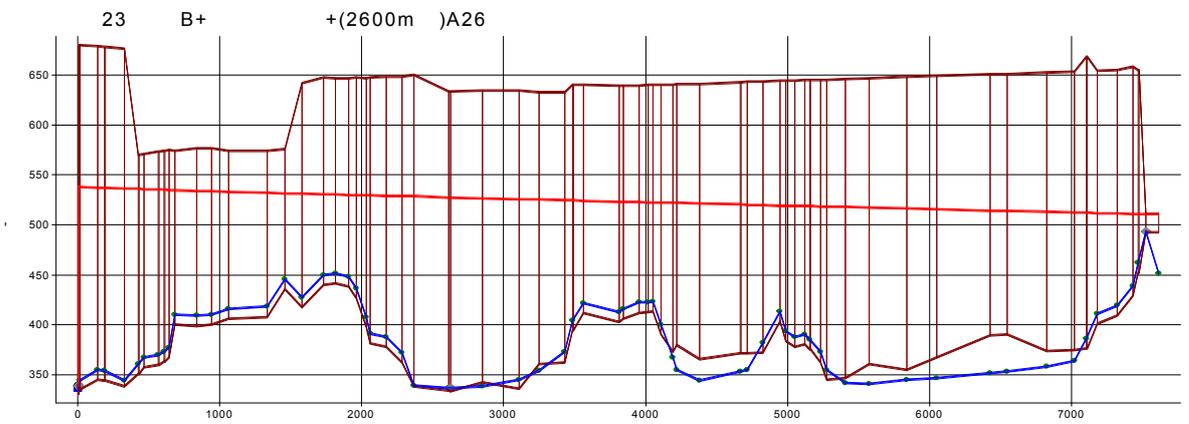
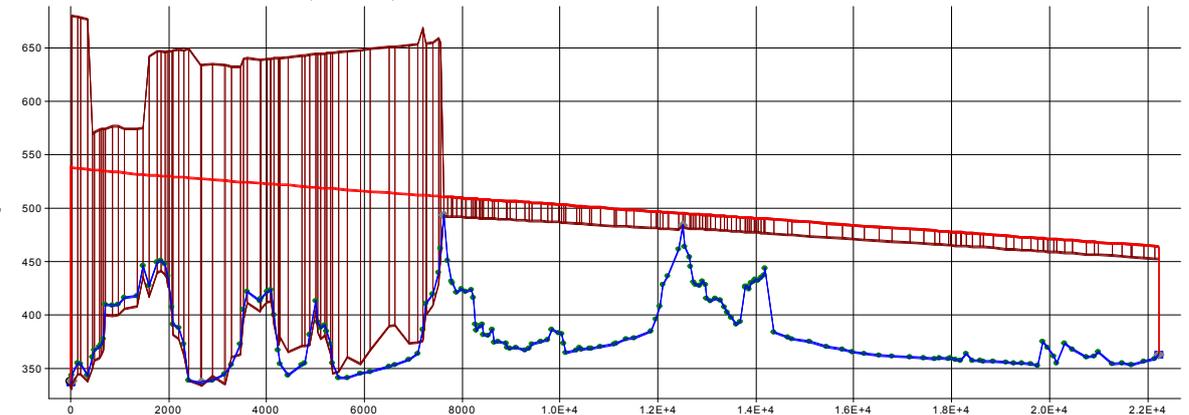


图 24 六安 B 空桩水土质检测及 A26 井水土质检测上游管处水土质检测



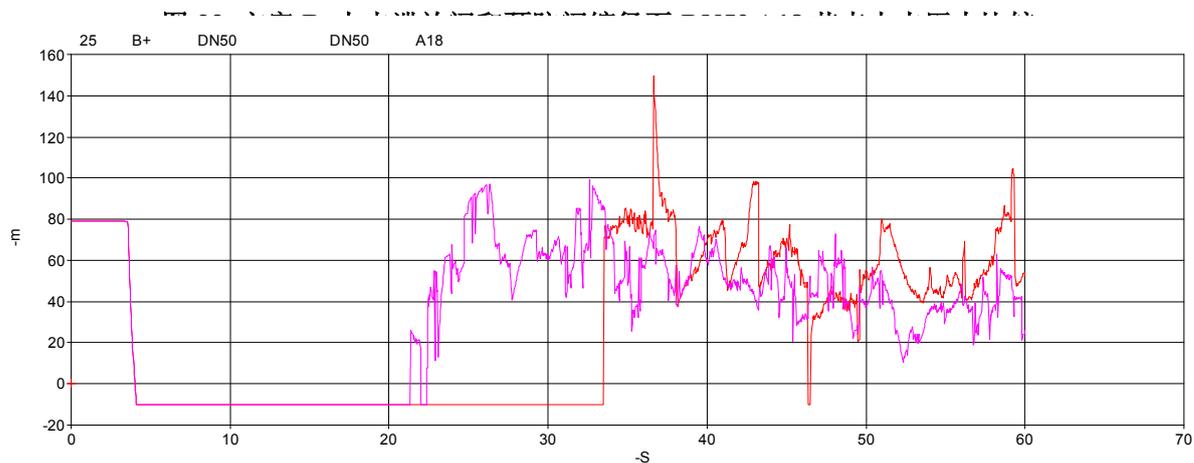
2.6 水击防护阀功能选择与口径选择的重要性

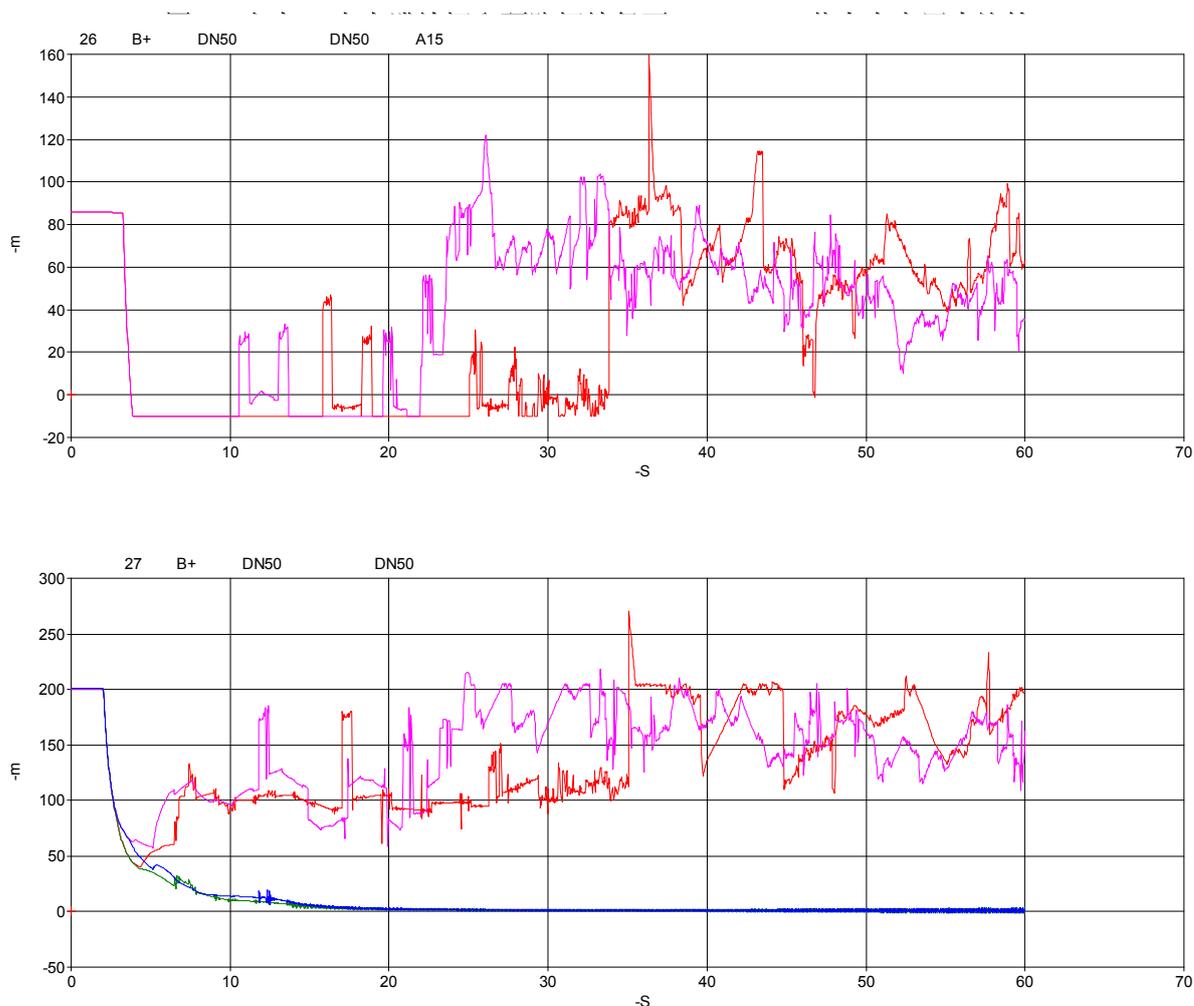
水击预防阀是比水击泄放阀功能更强更完善更高级的泵站水锤防护后保护设备，五十年代诞生于美国，经过几代更新换代，现在已经发展到了智能化的电子控制式的机电一体化阶段（第五代，前几代分别是：第一代，纯水力式高低压双导阀水击泄放阀 CD 型；第二代，带水力延时导阀的纯水力式三导阀水击泄放阀 BCD 型；第三代，带电磁导阀的电控型水击预防阀 BCDE 型；第四代，带水力放大器的 ABCDE 型水击预防阀）。但是，它价格昂贵，而且可能会使水力系统复杂化。许多场合，简单的水击泄放阀比复杂的水击预防阀可能更实用。通常情况下，建议选用一个或多个水击泄放阀与一个水击预防阀并联，而且选择预防阀的口径尽量小一点，不宜过大，对一个系统，少至 1 个多至 10 个泄放阀配套 1~2 个预防阀而且尺寸小 1~2 级的就可以。这里，为了防止泄水过多，我们把预防阀的口径变小为 DN50 试算看看，除口径外，其他设定条件与原来的相同，结果见图 22~24。实际的工程实践是：已经按照好的 DN100 预防阀口径无法改变，但是我们把预防阀上游的控制隔离闸阀 DN100 关小了大约 2/3，仅保留大约 1/3 的开度，从而达到比较理想的效果。该系统共有五级加压泵站，最高 280m 扬程，试运行几个月以来，每天开停泵 10 来次，几乎每次都是开阀停泵（虽然“艺高胆大”，毕竟过于冒险），尽管预防阀每次都开启泄水（这说明管线低压和高压波动都很大），庆幸的是整个管线系统都安然无恙。但是每天泄水多次对水击阀（属于安全阀类）而言应该说负荷过重：因为高压直接排向大气，压差高达 200~300m，阀口流速高达

$$v = c\sqrt{2g\Delta h} = 0.96\sqrt{19.62 * \Delta h} = 4.25 * \sqrt{\Delta h} = 4.25\sqrt{200 \sim 300} = 60 \sim 74m/s$$

如此高速水流对阀口的冲刷非常厉害，而且气蚀严重，会缩短寿命。水击阀不宜频繁开启泄水，它的正常工作状态应该是频率很低的间歇式开启-即所谓的后保护而已-protection，它不能站在预防水锤的前线，而前线的角色应该是由水泵控制阀和注气微排阀等预防设备充当-prevention，而 Protection \neq Prevention。

由图 22-24 看出，经水击泄放阀保护后压力比较稳定-粉红色线，而水击预防阀则引导空腔弥合水锤，而且它本身没有能力彻底消除这种（可能由自身泄水过多导致的）尖波型的弥合水锤。

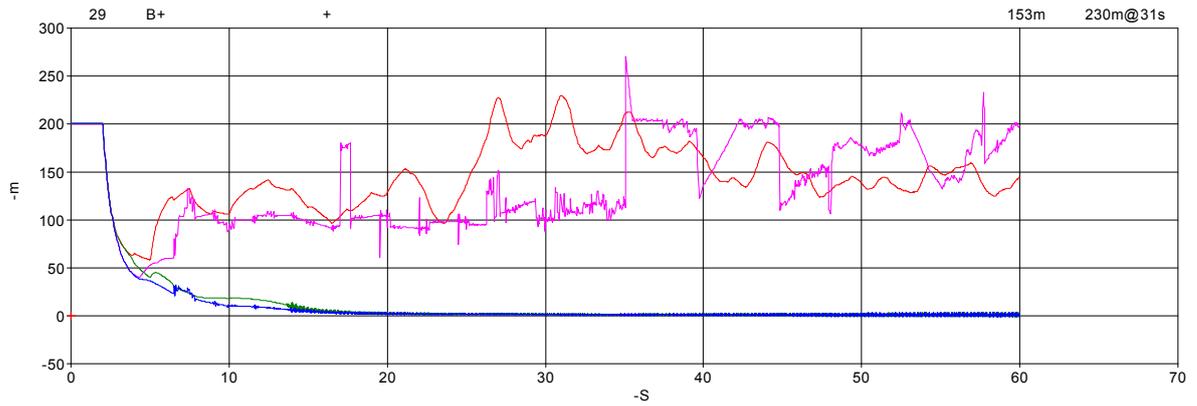




2.7 针对断流弥合水锤的特效防护措施

处于泵站附近的水锤防护设备对远在千米之外的管线上的某些节点产生的“空腔弥合水锤”效果甚微。这里介绍一种特效的针对措施：在这些特殊节点安装“注气微排阀”：稳态压力下常闭（能微量排气）；水柱拉断时在微负压状态下快开高速吸气（关键性能之一）；水柱弥合时高速吸气孔口提前关闭（关键性能之二）；吸进的大量空气首先消除负压，其次降低水柱返回的加速度，再次充当水柱弥合相撞时的弹性缓冲气囊，吸纳撞击能量，从而大幅降低撞击压力，达到消除空腔弥合水锤的目的；这些空气然后由微量孔口缓慢排除（局部最高节点上的空气一般不会与水混合而形成所谓的复杂难以分离的气液两相流）。以前许多文章所推荐的“高速进排气阀”因为其具有高速排气功能而不能代替这种特殊用途的“注气微排阀”。

安装了“注气微排阀”，并且取消了泵站的水击泄放阀或者预防阀（但是仍然保留 A26 节点附近的 DN100 的水击泄放阀，它对泵站以及较远的 A15-18 节点的影响很小）之后，3 个节点的水击压力历时曲线和上游水击包络线如图 25~28 所示。



缩短模拟时间至 60s 后，可以清晰的看出：7-8s 附近的第一波是第二高峰 A32-37 节点反射的水锤波，时间大约是 $2 \times 3500 / 1172 + \text{停泵 } 2s = 6 + 2 = 8s$ ；第二波是最高节点 A65 反射的水锤波跟第一波干涉的结果；第四波就是由第一高峰 A15-18 节点反射的弥合水锤（与其他三波干涉的结果）。所以，止回阀的关阀方案不仅影响由最高处反射的（那个）水锤强度（不一定最大），同时对某些特殊节点可能产生的弥合水锤也有影响。看来止回阀或者水泵控制阀的关阀方案对泵站和管线的停泵水锤的影响比以前所认知的更复杂，需要借助于现代计算机技术进行严密仔细的科学分析，每个具体工程都需要具体分析，没有通用的工程经验可以简单套用。

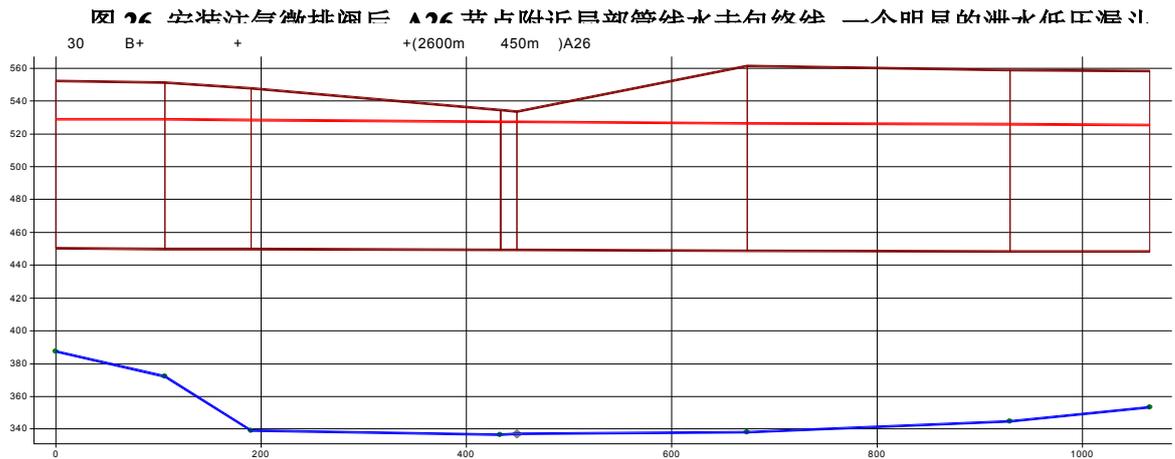
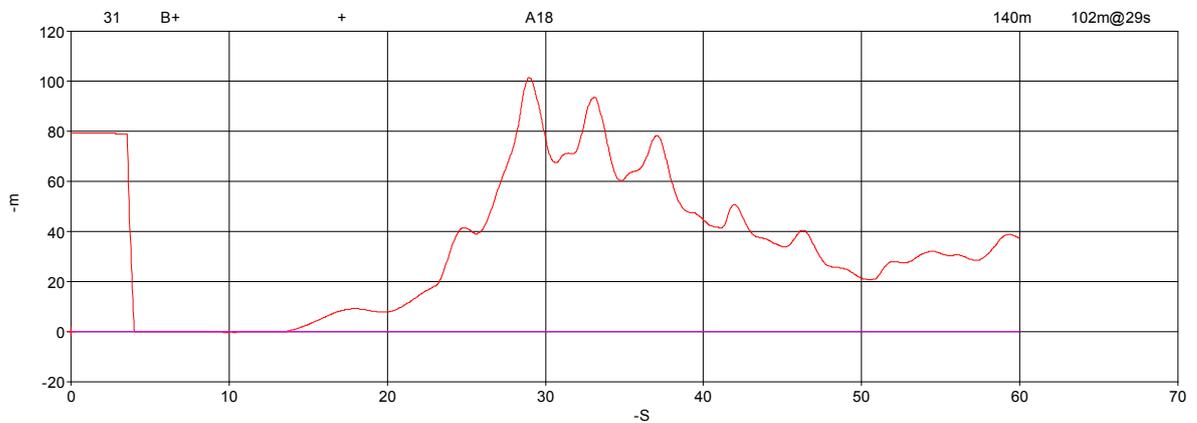
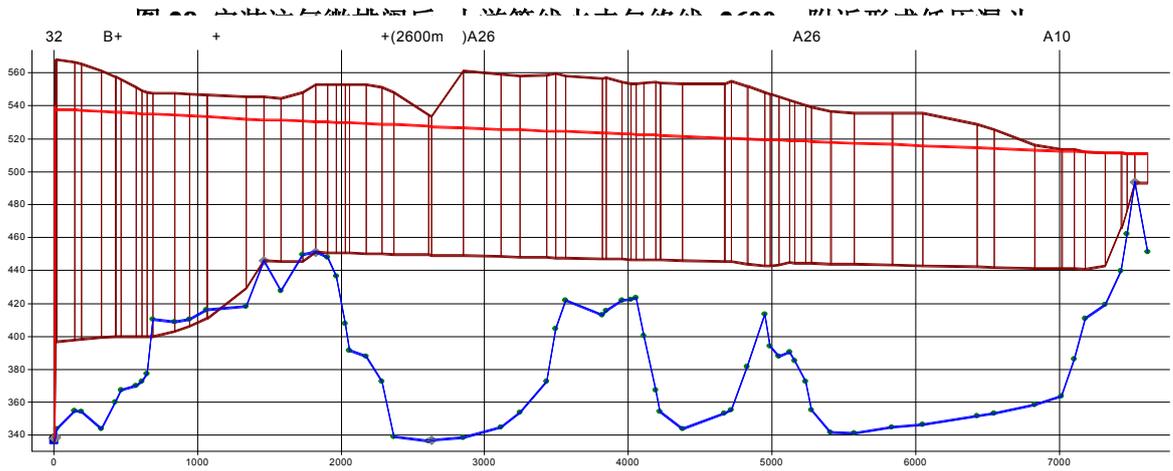


图 27 安装补气微排阀后 A18 节点水击压力历时曲线

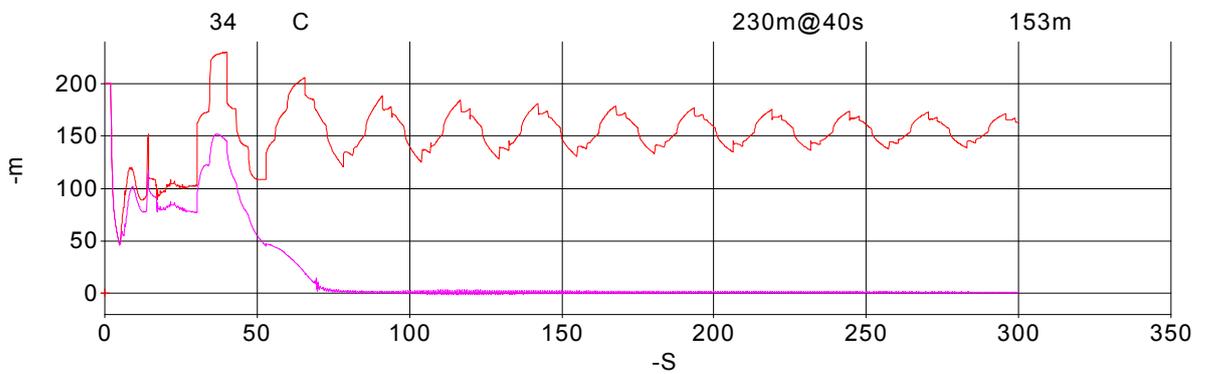
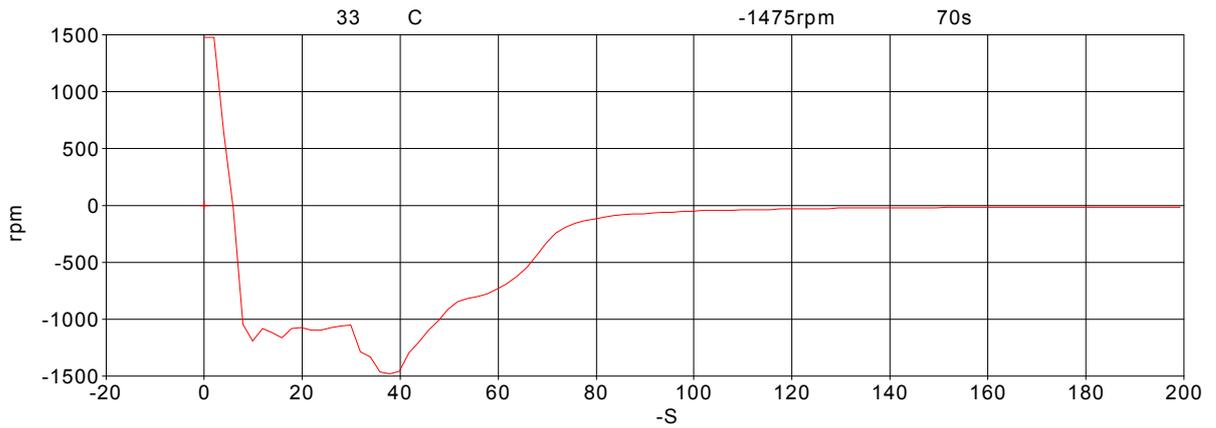




3 方案 C: 5S 快闭 90%, 64S($\approx 5\mu_1$)缓闭 10%

调节止回阀或者水泵控制阀的二阶段关闭时间，可以找到一个最佳的方案：既保证泵站止回阀处的停泵水锤尽量地低，又使水泵倒转速不超过限定值，还可以使沿线个别节点不产生空腔弥合水锤或者使产生的弥合水锤值尽量地小。借助软件，似乎可以为本工程找到这个三方都满意的方案，这就是止回阀关闭方案 C，见图 29~33。

图 33 方案 C 水泵转速压时曲线



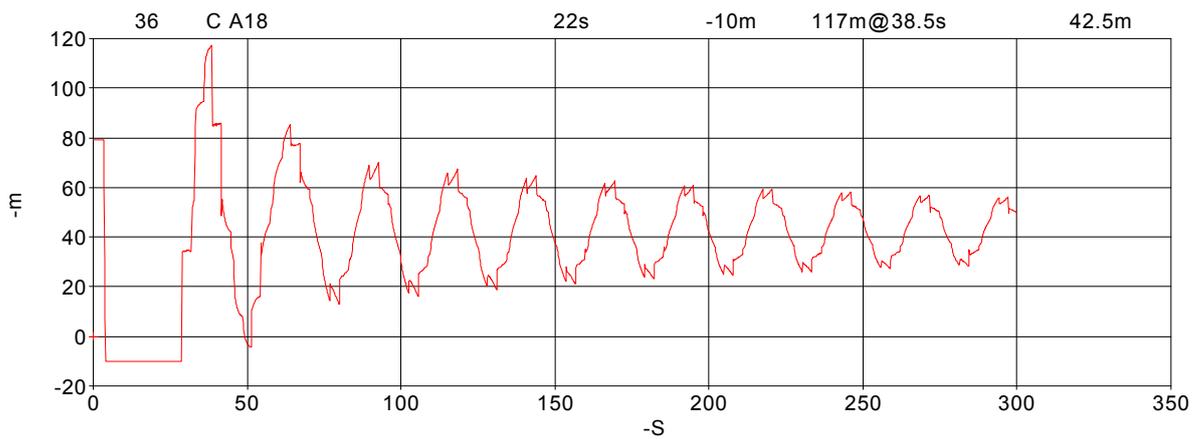
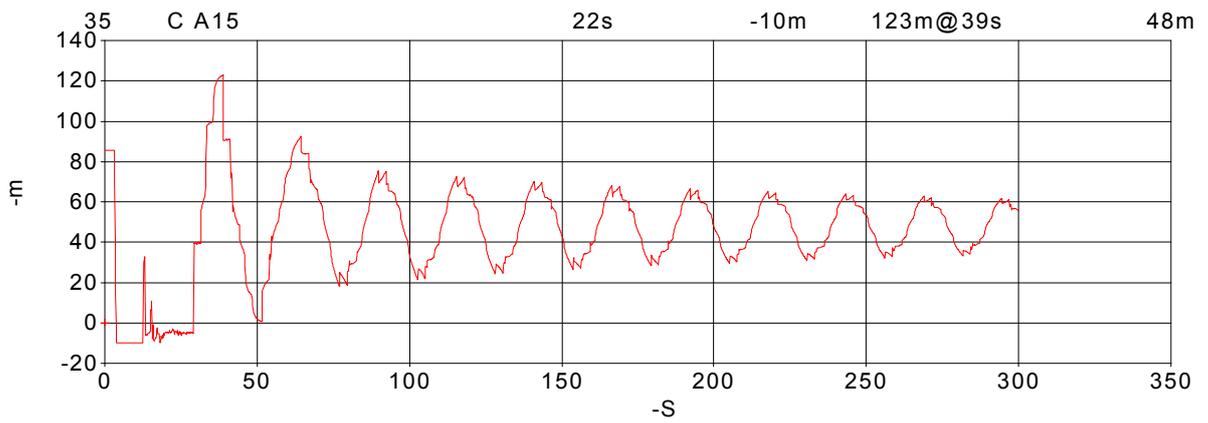
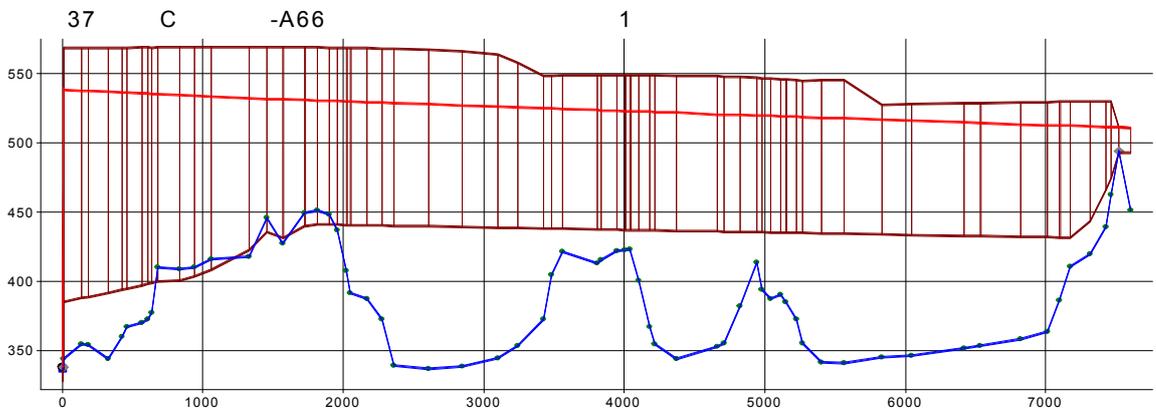


图 22 方案 C 止回阀至 A66 节点间的管线的压力与物线



此方案 C 挺好，可惜因为这个约-1470rpm 的水泵倒转速虽然没有超出规范规定值，但却被水泵厂家认为反转速过高，以及由于水泵控制阀二阶段关阀时间调节难以做到多方兼顾而没有采用。但是，既能做到这个最佳的关阀方案，也不能保证每次停泵都能做到成功消锤：止回阀或者水泵控制阀不能保证每次操作都能成功地按照预先方案执行，它有偏离或者失误或者拒动作的可能。因此，仍需要设置后保护措施-protection 如：合适口径的水击泄放阀或者水击预防阀，并且安装在合适的位置。

4 沿线空气阀设计方案

在多数局部较高节点（下列 14 个节点）安装 DN50+50+1.6 复合式空气阀：A13、A32、A37、A45、A65、A114、A70、A72、A93、A142、A161、A170、A175、A179；而在下列 3 个节点安装专用于能消除空腔弥合水锤的“注气微排阀”：高速吸气孔口 50+高速排气孔口 20（特殊处理）+

微量孔口 1.6mm: A10、A15、A18。

5 结语

由于长距离输水管线具有管线长、流量大、扬程高、多起伏等特点, 停泵水力过渡过程比较复杂, 其最显著的特征就是在管线局部高点或者管段可能发生断流弥合水锤。在断流弥合水锤的发生和发展过程中, 负压的存在容易造成管道受压变形以及外界污染物和微生物的入侵, 影响输水水质, 而弥合升压对管道造成的剧烈的压力振荡容易导致管道的疲劳损坏, 并引发爆管事故。因此, 必须高度重视事故停泵所引起的断流弥合水锤的分析与防护, 并通过详细的数值计算, 找到技术可靠、经济合理、管理方便的停泵水锤防护措施。由本文模拟分析及工程实践可知, 水击泄放阀可以有效地削减停泵或者关阀引起的正压水锤, 跟一个合适尺寸的水击预防阀配套可以进一步提高泵站停泵水锤的防护等级, 而注气微排阀可以有效地消除停泵水力过渡过程中的断流弥合水锤。三者可以相互配套应用于高扬程长距离输水管线工程, 分别解决正压水锤和负压水锤问题。水击防护阀和注气微排阀结构简单, 反应灵敏, 性能稳定可靠, 在美国已经有 40~100 年的应用历史, 在国内也已经有 10~20 年的应用历史, 对安装点的空间要求不高, 耗资少, 在停泵水锤防护方面具有相当的技术和经济优势。

参考文献

- [1] 金锥, 姜乃昌等. 停泵水锤及其防护 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 丁峰, 娄性义. 城市输配水管道爆破机理与防护技术分析[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2005, 15(4):30-34.
- [3] Wood, D.J. Waterhammer Analysis – Essential and Easy(and Efficient) [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(8): 1123 - 1131.
- [4] Jung, B.S., Boulos, P.F & Wood, D.J.. A Lagrangian wave characteristic method for simulating transient water column separation [J]. Jour. AWWA, 2009, 101(6):64-73.
- [5] Dhandayudhapani Ramalingam, Srinivasa Lingireddy&Wood, D.J.. Using the WCM for transient modeling of water distribution networks[J]. Jour.AWWA, 2009, 101(2):75-89.
- [6] Srinivasa Lingireddy, Wood, D.J.&Naftali Zloczower. Pressure surges in pipeline systems resulting from air release[J]. Jour. AWWA, 2004, 96(7):88-94.
- [7] Mr. Joseph E. Lescovich, The control of water hammer by automatic valve, Southwest Section AWWA, 1966

Protection of Pump-stopping Water Hammer of Long Distance Pumping System

An Rongyun¹ Chen Yifei²

(1 College of Urban Construction and Environment Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Shenzhen Farada M&E Technology Co., Ltd. Shenzhen 518034, China)

Abstract: Three kinds of surge prevention measures were analyzed and the numerical simulation was carried out for an actual project, indicating for long distance pumping system, water column separation accompanying transient flow is typical for the hydraulic transient caused by pump-stopping. At the end, combination vacuum relief & air release valve was proved to play a significant role in prevention of water hammer with column separation.

Key word: pump-stopping water hammer; hydraulic transient with column separation; Surge relief valve; surge protection & prevention; combination vacuum relief & air release valve

安荣云, 女, 1984 年生, 硕士研究生, 通讯地址: surge@surge-analysis.net

