

城市深层隧洞输水系统水力过渡过程特性分析

冯艳, 张钦*, 瞿方乐

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014)

摘要:【目的】研究城市深层隧洞输水系统的水力过渡过程特性。【方法】以西丽水库至南山水厂原水管工程实例为研究对象, 利用 Bentley hammer 软件建立输水系统模型; 分析启泵间隔时间对输水系统稳定性的影响, 并进一步分析典型工况下管道糙率对输水系统稳定性的影响; 探究增设 3#竖井为调压井对输水系统稳定性的影响。【结果】当启泵间隔时间大于 240 s 时, 2#竖井最低瞬态水位趋于稳定; 管道糙率越大, 启泵工况下最低瞬态水位越低, 事故停泵工况下涌浪水位的超调量越大; 增设 3#竖井作为调压井对输水系统水锤压力极值影响不大。【结论】启泵间隔时间大于 240 s 时, 启泵间隔时间对输水系统稳定性几乎没有影响; 管道糙率越大, 典型工况下系统稳定性越差; 增设 3#竖井作为调压井后需投入大量维护成本, 且对输水系统水锤压力极值影响不大, 故不建议设置为调压井。

关键词: 深层隧洞; 输水系统; 水力过渡过程; 竖井; Bentley hammer

中图分类号: TV136.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023154

冯艳, 张钦, 瞿方乐. 城市深层隧洞输水系统水力过渡过程特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 170-174.

FENG Yan, ZHANG Qin, QU Fangle. Characteristic Analysis of Hydraulic Transition Process of Water Conveyance System in Urban Deep Tunnel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 170-174.

0 引言

【研究意义】随着我国城市化进程加快, 城市规模不断扩大, 尽管加大了对水源水质的保护力度, 但仍然存在缺水的风险。目前, 国内许多城市已兴建多条长距离输水工程来解决城市水资源分配不合理的情况。然而, 城市供排水系统容易受到地面条件的限制, 深层隧洞输水系统由此得到了迅速发展。深隧系统在水力学特性上较一般输水工程更为复杂。在深层有压输水工程中, 水锤是一种不可避免的水力过渡现象, 在输水系统中引起剧烈的压力波动, 产生结构振动和噪声, 威胁工程的安全稳定运行^[1-4]。深层隧洞输水系统在水力特性上往往具有以下特点: ①同时包含了重力流和泵站加压两种输水方式、埋置深度大、压力水头大、输水管线较长、进排气设施布置困难; ②提升泵站进水空间小, 工况转换下水流流态复杂多样。为满足深层隧洞的施工, 往往需要设置多个施工竖井。竖井在输水系统中, 可与输水隧洞连接, 作为过流通道和调压井, 也可在泵压输水中作为提水泵站的进水前池。水泵在启动和事故停泵时, 深竖井可以降低输水系统水锤极值压力。然而, 深竖井的引入使得输水系统耦联关系多样、暂态过程复杂, 给系统的

安全与稳定运行带来了巨大挑战^[5-7]。因此, 开展带有深竖井的深层隧洞输水系统过渡过程特性研究显得十分必要, 可为长距离深层隧洞输水系统的设计运行奠定应用基础和技术支撑。【研究进展】目前, 对长距离输水工程过渡过程特性的研究, 除了国际上取得的进展外, 我国专家学者也做了大量的研究工作。韩凯等^[8]对长距离有压输水工程泵站的水锤进行了数值分析, 研究表明, 合理的启泵时间间隔有助于改善有压输水系统在水力过渡过程中动态特性。刘有亮等^[9]对超高扬程及长距离泵站水锤分析及防护设置进行了研究。桑林瀚等^[10]对长距离有压输水系统泵站前双向调压井水锤防护特性进行了研究, 分析了泵站前设置非溢流式圆形截面双向调压井时不同调压井体型参数对管路水锤压力的影响。姬华生等^[4]对长距离输水管道系统水力特性进行了分析, 研究表明: 稳态工况下, 各管线末端流量控制阀前压力较大, 阀门将长期处于小开度状态运行; 瞬态工况下, 支管流量控制阀流量出现有很小量的振荡, 从而导致主管低压区压力出现很小量的振荡。然而, 以往学者对带有深竖井的深层隧洞输水系统过渡过程特性并未进行深入的研究。【切入点】本文以具体工程实例为研究对象, 基于 Bentley hammer 软件对长距离深层隧洞输水系统进行数值仿真, 定性和定量的分析启泵间隔时间及管道糙率对输水系统稳定性的影响, 并探究增设 3#竖井为调压井对输水系统稳定性的影响。【拟解决的关键问题】结合工程实例, 研究带有深竖井的深层隧洞输水系统过渡过程特性, 通过探究机组启泵间隔时间对输

收稿日期: 2023-04-10 修回日期: 2023-04-10

作者简介: 冯艳 (1985-), 女, 正高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水工结构设计方面研究。E-mail: 45369184@qq.com

通信作者: 张钦 (1992-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事水力学研究。E-mail: 2582330602@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

水系统稳定性的影响，确定合理的启泵方式；通过探究增设竖井作为调压井对输水系统水锤压力极值的影响，以指导长距离深层隧洞输水工程的设计运行。

1 材料与方法

1.1 工程概况

西丽水库至南山水厂原水管工程位于深圳市南山区，工程从西丽水库取水，通过深层输水隧洞及提水泵站向南山水厂输送原水，是深圳市第一条深层隧洞输水工程。工程设计输水规模为 $130 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，主要建筑物包括取水口、输水隧洞、竖井、泵站及附属建筑物，输水线路总长 5 327 m。1#竖井至 2#竖井段长 5 129 m，隧洞埋深约 50~200 m。根据施工和后期运行维护需要设置 3 个竖井，1#竖井和 2#竖井与输水隧洞连通，作为过流通道；3#竖井作为 TBM 施工出渣井，TBM 施工结束后可回填，也可设计成调压井作为输水系统的一部分。提水泵站结合 2#竖井布置于输水隧洞末端，工程总布置如图 1 所示。

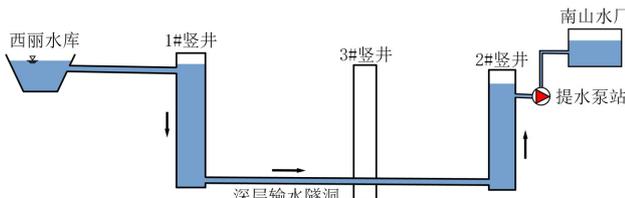


图1 工程总布置

Fig.1 The general layout of the project

1.2 计算理论

水锤基本微分方程式由水锤过程中的运动方程和连续方程两部分组成。其是全面表达有压管流中非恒定流动规律的数学表达式，均以偏微分方程形式反映了水锤场中流速和水头的变化规律，是水力过渡过程研究分析的理论基础。水锤计算的基本微分方程表达式为：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \sin \alpha \right) + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f_w}{D} \frac{V|V|}{2g} = 0, \quad (2)$$

式中： H 为测压管水头； f_w 为摩擦系数； D 为管道直径； A 为管道面积； t 为时间变量； a 为水锤波速； g 为重力加速度； x 为沿管轴线的距离。

目前特征线法是求解管道系统水力瞬变最常用的方法。把 2 个偏微分方程进行组合，然后联立解得到 4 个全微分方程，即 2 组特征方程。虽是常微分方程，但由于摩擦项中速度 V 与时间 t 的关系不能建立，无法积分出解析式，故只能用数值计算的方法求解。依据已有特征线方法的计算原理，对式 (1)、式 (2) 进行求解得出式 (3)、式 (4)，用 C^+ 和 C^- 代表 2 个

方向的特征线。

$$\frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|}{2gD} V = 0, \quad \frac{dx}{dt} = a, \quad C^+, \quad (3)$$

$$-\frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|}{2gD} V = 0, \quad \frac{dx}{dt} = -a, \quad C^-, \quad (4)$$

在研究中长距离有压输水工程数值模拟时，应处理边界条件：在边界处的点仅有 1 条特征线，即起点为 C^- ，终点为 C^+ ，只有附加边界条件才能将管线上所有计算点的瞬时参数计算出来。

1.3 水力过渡过程数值模型

本工程西丽水库至 2#竖井采用重力有压自流输水，输水隧洞内衬采用钢管，管径 4.00 m 沿线设置 3 个 TBM 施工竖井，1#竖井位于桩号 k0+000，直径 28.00 m，井深 76.11 m；中间 3#竖井位于桩号 k3+137，直径 16.00 m，井深 73.73 m、下游 2#竖井位于桩号 k5+129，直径 23.80 m，井深 79.62 m。2#竖井和提水泵站位于南山水厂东侧附近，提水泵站结合 2#竖井布置，采用 5 台立式混流泵（4 用 1 备），泵站总装机容量为 $5 \times 710 \text{ kW}$ ，单机流量 $3.76 \text{ m}^3/\text{s}$ ，设计扬程 12.91 m，水泵转动惯量 300 kg m^2 。

本次建模计算采用 Bentley hammer 软件，其水锤计算方法采用特征线法。该软件包含较多的水力模型以及众多水锤防护模型，可以很好地模拟实际的供水工程。将上述工程参数输入 Bentley hammer 软件对应的水力模型和水锤防护模型中，可得到该工程的数值分析模型，如图 2 所示。

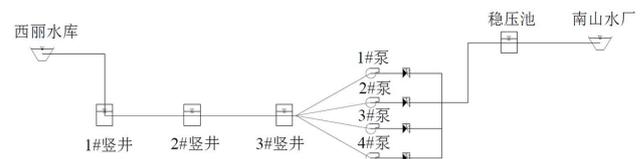


图2 工程数值模型

Fig.2 Engineering numerical model

2 仿真与分析

根据西丽水库至南山水厂深层隧洞输水系统水力过渡过程的数值模型分析开展带竖井的深层隧洞输水系统水力过渡过程特性，研究长距离输水系统过渡过程的重要因素（如管道糙率、泵站机组启泵间隔时间、调压竖井的设置等）对输水系统稳定性的影响。2#竖井的动态特性是该输水系统稳定性的关键，因此，通过定性和定量的比较分析 2#竖井的动态特性，给出适用于本工程的较优参数，指导该输水系统的设计运行。

2.1 启泵间隔时间对系统稳定性的影响

本工程将 2#竖井作为提升泵站前池，水泵机组启泵时会让竖井水位发生急剧变化，通过对水泵启泵工况时输水系统进行过渡过程分析，可以得到 2#竖

井最低水位,为水泵安装高程确定提供参考。同时,通过模拟水泵机组不同启动间隔时间对 2#竖井水位波动的影响,给出水泵机组最优启动间隔时间,指导泵站的设计运行。

泵站前池最低水位的控制条件为西丽水库处于最低水位时,4台泵逐台启动的工况。分别计算4台机同时启动、间隔 120 s、间隔 240 s、间隔 300 s 和间隔 360 s 逐台启动。启泵过程中 2#竖井水位变化过程如图 3 所示,最低水位统计如图 4 所示。

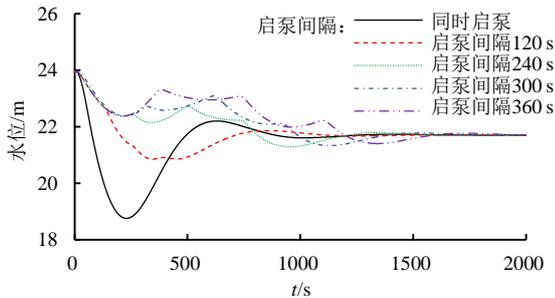


图3 不同启泵间隔条件下2#竖井水位波动动态响应

Fig.3 Dynamic response to water level fluctuations in shaft 2# at different pump start intervals

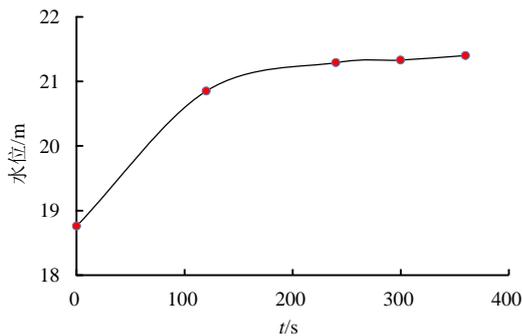


图4 不同启泵时间间隔下 2#竖井最低水位

Fig.4 Minimum water level of 2# shaft at different pump start intervals

以上结果表明:启泵间隔时间对 2#竖井(水泵前池)最低瞬态水位有一定的影响。水泵机组同时启动时,2#竖井最低瞬态水位为 18.76 m,比水泵机组稳定运行后低 2.91 m;随着启泵间隔时间增加,2#竖井最低水位逐渐上升,当启泵间隔时间大于等于 240 s 时,2#竖井最低瞬态水位趋于稳定;2#竖井最低瞬态水位越大,水泵进水流道淹没深度越大,对输水系统运行也越安全。因此,建议泵站机组启动间隔时间为 240 s。

2.2 管道糙率对系统稳定性的影响

输水隧洞内衬采用钢管,新管时糙率约为 0.012 0,本工程设计糙率采用 0.013 5,由于该地区淡水壳菜生长较多,随着输水系统长期运行,淡水壳菜会附着在管壁上导致管道糙率增大。在泵站机组启动间隔时间 240 s 时,为研究糙率对系统稳定性的影响,分别在启泵工况和事故停泵工况 2 个典型下,选取 0.012 0、

0.013 5、0.015 0、0.017 0 共 4 组糙率进行仿真分析。

1) 启泵工况

启泵工况 2#竖井水位动态响应及最低瞬态水位如图 5、表 1 所示,由图 5、表 1 可知,在西丽水库多年最低水位 23.95 m 启泵时,以 240 s 为启泵间隔,管道糙率越大,2#竖井最低瞬态水位越低。当管道处于初期糙率 0.012 0 时,2#竖井最低瞬态水位达到 21.58 m;管道糙率为 0.013 5 时,2#竖井最低瞬态水位达到 21.29 m;管道糙率为 0.015 0 时,2#竖井最低瞬态水位达到 20.98 m;管道糙率为 0.017 0 时,2#竖井最低瞬态水位达到 20.48 m。

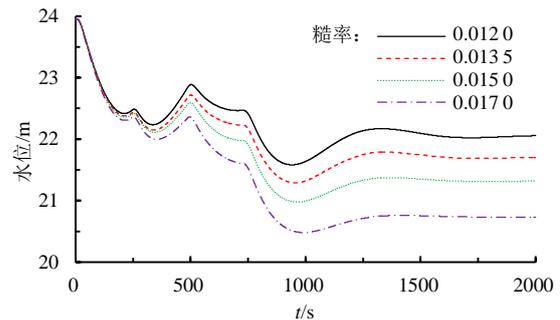


图5 启泵时管道不同糙率下2#竖井水位动态响应

Fig.5 Dynamic response of water level in shaft 2# at different roughness of the pipe at pump start

表1 启泵时不同糙率下2#竖井最低瞬态水位

Table 1 Minimum transient water level in shaft 2# at different roughness at pump start

管道糙率 n	2#竖井最低瞬态水位/m
0.012 0	21.58
0.013 5	21.29
0.015 0	20.98
0.017 0	20.48

2) 事故停泵工况

当输水系统处于最高运行水位(对应西丽水库设计洪水位 30.98 m)时,输水系统初始内水压力最大,相应的 4 台水泵同时事故停泵的水锤压力也最大。此时,仿真分析管道糙率对系统稳定性的影响,2#竖井水位变化过程及特征水位如图 6 所示、表 2 所示。

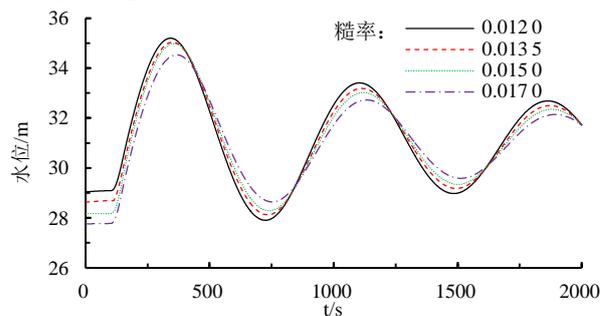


图6 事故停泵时管道不同糙率下2#竖井水位动态响应

Fig.6 Dynamic response of water level in shaft 2# under different roughness of the pipe during accidental pump stoppage

表 2 事故停泵时管道不同糙率下 2#竖井最高瞬态水位

Table 2 Maximum transient water level in shaft 2# at different roughness of the pipe during accidental pump stoppage m

糙率 n	2#竖井水位	最高水位	涌浪高度
0.012 0	29.04	35.18	6.14
0.013 5	28.70	35.00	6.30
0.015 0	28.28	34.82	6.54
0.017 0	27.76	34.53	6.77

由图 6、表 2 可知，当输水系统处于最高运行水位（对应西丽水库设计洪水位 30.98 m）时，泵站在正常运行下所有水泵发生事故停泵，造成 2#竖井水位急剧上升，此时 2#竖井最高水位为 35.18 m，对应的管道糙率为 0.012 0，涌浪高度为 6.14 m；不同糙率对 2#竖井水位波动也有影响，糙率越大，涌浪越大，在糙率 $n=0.017 0$ 时，涌浪高度达 6.77 m。

以上结果表明：当输水系统处于最高运行水位（对应西丽水库设计洪水位 30.98 m）时，泵站在正常运行下所有水泵发生事故停泵，造成 2#竖井水位急剧上升，此时 2#竖井最高水位为 35.18 m，对应的管道糙率为 0.012 0，涌浪高度为 6.14 m；不同糙率对 2#竖井水位波动也有影响，糙率越大，涌浪越大，在糙率 $n=0.017 0$ 时，涌浪高度达 6.77 m。

2.3 增设调压井对系统稳定性的影响

2#竖井水位的动态特性是输水系统稳定性的关键。在西丽水库最低运行水位 23.95 m 时逐台启动水泵机组以及西丽水库最高运行水位 30.98 m 时运行水泵机组同时事故停泵这两个典型工况下，2#竖井的运行安全是整个输水系统稳定的必要条件。3#竖井作为 TBM 施工的出渣井，完成后可改造成输水管道的调压井，也可以进行回填不作为调压井使用。为探究增设 3#竖井为调压井对输水系统稳定性的影响，分别在这两个典型工况下，对比分析 3#竖井是否设为调压井对 2#竖井稳定性的影响。逐台启泵工况下水泵启动间隔为 240 s。仿真结果如图 7、图 8、表 3 所示。

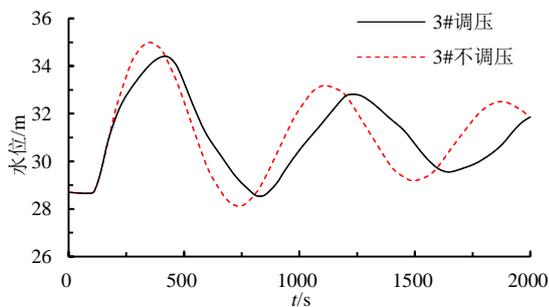


图 7 3#竖井对事故停泵时 2#竖井水位动态响应的影响

Fig.7 Influence of shaft 3# on dynamic response of shaft 2# water level during accidental pump stoppage

由图 7、图 8、表 3 可知，增设 3#井作为调压井，

2#井水位在机组逐台启泵时最低水位升高 9 cm，在事故停泵时最高水位降低 62 cm。考虑到将 3#井改造成调压井后需要维护，且对输水系统极值水锤压力影响不大，故不建议设置为调压井。

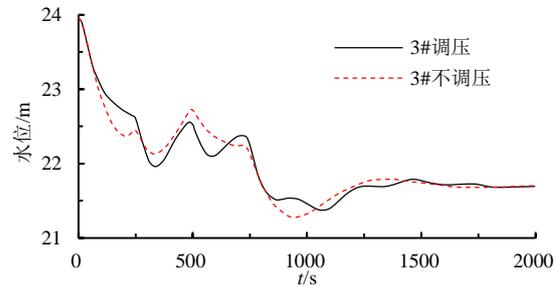


图 8 3#竖井对启泵过程中 2#竖井水位动态响应的影响

Fig.8 Influence of shaft 3# on dynamic response of water level in shaft 2# during pump start

表 3 不同工况下 3#竖井对 2#竖井极值水位的影响

Table 3 Influence of shaft 3# on the extreme water level of shaft 2# under different working conditions

工况	3#井不作为调压井时	3#井作为调压井时
	2#最高水位	2#最低水位
事故停泵	35.00	34.38
逐台启泵	21.29	21.38

3 结论

1) 泵站机组启泵过程中，2#竖井最低瞬态水位在启泵间隔时间大于 240 s 时几乎不变，故建议泵站机组启动间隔时间为 240 s。

2) 管道糙率对输水系统稳定性产生了一定的恶化。启泵工况下管道糙率越大，2#竖井最低瞬态水位越低，系统稳定性越差；事故停泵工况下管道糙率越大，涌浪水位的超调量越大，系统稳定性越差。

3) 增设 3#竖井为调压井时，2#竖井水位在启泵时最低水位升高 9 cm，在事故停泵时降低最高水位 62 cm。考虑到将 3#竖井增设成调压井后需要运行维护成本，且对输水系统极值水锤压力影响不大，故不建议将 3#竖井增设成调压井。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华. 停泵水锤及其防护[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 李小周, 朱满林, 陶灿. 空气阀型式对压力管道水锤防护的影响[J]. 排灌机械学报, 2015, 33(7): 599-605.
- [3] 周建旭, 邵卫红, 黄笑同, 等. 设置并联调压室的长引水式水电站稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 159-164.
- [4] 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(S1): 27-30.
- [5] 王思琪, 俞晓东, 倪尉翔, 等. 长距离供水工程空气罐调压塔联合防护水锤[J]. 排灌机械学报, 2019, 37(5): 406-412.
- [6] 白绵绵, 王福军, 雷澄, 等. 旁通阀对长距离重力流输水管道水力过

- 渡过程的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 58-62.
- [7] QU F L, GUO W C. Robust H^∞ control for hydro-turbine governing system of hydropower plant with super long headrace tunnel[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106 336.
- [8] 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.
- [9] 刘有亮, 胡斌超. 超高扬程及长距离泵站水锤分析及防护设置[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 112-117.
- [10] 桑林瀚, 王英伟, 郑慧洋, 等. 长距离有压输水系统泵站前双向调压井水锤防护特性研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 112-115.

Characteristic Analysis of Hydraulic Transition Process of Water Conveyance System in Urban Deep Tunnel

FENG Yan, ZHANG Qin^{*}, QU Fangle

(PowerChina ZhongNan Engineering co.,Ltd, Changsha 410014, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of this paper is to study the characteristics of the hydraulic transition process of the urban deep tunnel water delivery system. 【Method】First, take specific engineering examples as the research object and use Bentley hammer software to establish a water delivery system model. Then, analyze the influence of the pump start interval on the stability of the water delivery system, and further analyze the influence of the pipeline roughness on the stability of the water delivery system under typical working conditions. Finally, explore the impact of adding 3# shaft as a surge tank on the stability of the water delivery system. 【Result】The results showed that when the pumping interval was longer than 240 s, the lowest transient water level of shaft 2# tended to be stable. The greater the roughness of the pipeline, the lower the lowest transient water level under pump-starting conditions, the greater the surge water level overshoot under pump-off conditions. The addition of 3# shaft as a surge tank had little effect on the extreme value of water hammer pressure in the water delivery system. 【Conclusion】The pumping interval is longer than 240 s, it has almost no effect on the stability of the water delivery system. The greater pipe roughness is unfavorable for the system stability under typical working conditions. The addition of 3# shaft as a surge tank requires a lot of maintenance costs, and has little effect on the extreme value of water hammer pressure in the water delivery system, so it is not recommended to set it as a surge tank.

Key words: deep tunnel; water delivery system; hydraulic transition process; shaft; Bentley hammer

责任编辑: 赵宇龙