

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.02.011

长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果

梁圣辰^{1,2}, 张健^{1,2}, 贺蔚^{1,2}, 唐洪武^{1,2}, 肖洋^{1,2},
何平³, 廖俊杰³, 蒋捷^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635)

摘要: 结合某长距离、大流量输水工程, 系统分析了单阻抗调压室和串联多阻抗调压室两种布置情况下阻抗孔径对水锤防护效果和最低涌浪的影响。结果表明: 单阻抗调压室防护方案下, 通过改变调压室阻抗孔径可降低水锤压力, 提升调压室最低涌浪, 有效减小调压室占地面积; 相比于单阻抗调压室防护方案, 串联多阻抗调压室的防护效果更佳, 可提高管线最小压力和最低涌浪, 显著减小调压室总面积, 且主、辅调压室均存在最优阻抗孔径。

关键词: 长距离输水工程; 串联多阻抗调压室; 阻抗孔径; 水锤; 涌浪

中图分类号: TV672⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)02-0170-06

Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system

LIANG Shengchen^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2}, HE Wei^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}, XIAO Yang^{1,2},
HE Ping³, LIAO Junjie³, JIANG Jie^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Nanjing 210098, China;
3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510635, China)

Abstract: A long-distance and large-flow water conveyance project is selected as a study case, and effects of the diameter of impedance hole on the water hammer protection and the minimum surge are systematically analyzed under two layouts, which are single throttled surge chamber and series throttled surge chambers. The results show that for the single throttled surge chamber scheme, through changing the diameter of the impedance hole of the surge chamber, the water hammer pressure can be reduced, the minimum surge in the surge chamber can be increased, and the surge chamber area can be effectively reduced. Compared with the single surge chamber scheme, the effect of the series throttled surge chambers is better, for it can increase the minimum pressure along the pipeline and the minimum surge, significantly reduce the total area of the surge chambers, and all the surge chambers have optimal impedance apertures.

Key words: long-distance water conveyance projects; series throttled surge chambers; impedance hole aperture; water hammer; surge

长距离输水工程能够有效连通各大水系、解决水资源分配问题^[1-2]。由于地形落差往往需要水泵加压输水^[3], 但水泵抽水掉电后, 降压波向管线下游传播, 压力较小处压力可能降至汽化压力, 导致水柱分离^[4-6], 水柱弥合后可能产生巨大压力, 严重破坏管线水力元件, 造成经济损失, 故需要在系统管线设置水锤防护措施。

张健等^[7-10]对空气阀、单向塔、双向调压室、空气罐、超压泄压阀、泵后蝶阀两阶段关闭等常用水锤防护措施进行了详细研究, 朱雪强等^[11-13]研究表明, 针对一些特殊输水工程, 联合防护方案能取得良好的防护效

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401810); 江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”专项(BRA2018061); 江苏省基础研究计划青年基金(BK20190488); 国家自然科学基金青年科学基金(51909070)

作者简介: 梁圣辰(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事长距离、跨流域泵站输配水系统的供水安全研究。E-mail: 2421398598@qq.com

通信作者: 贺蔚, 副研究员。E-mail: hewei@hhu.edu.cn

引用本文: 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.

果。针对调压室,童祥等^[14]系统研究了阻抗孔面积与输水管道面积的合理比值,陈岚等^[15]给出了串联双调压室临界断面的设计方法,张帅等^[16]分析了上游串联双调压室的合理尺寸,张健等^[17]探讨了气垫调压室临界断面计算中的合理参数取值,周建旭等^[18]建立不同水力模型对设置并联调压室的水电站稳定性进行了讨论。

在长距离、大流量输水系统中,水流惯性往往较大,对于出水池水位较低而管线布置高程较高的输水系统,水泵抽水掉电后泵后管线压力除了受第一波降压波影响外,较大的涌浪降幅也将对输水系统产生较大的影响,容易造成调压室涌浪过低,管线出现负压。仅在泵后设计调压室往往需要较大面积,故有必要增设辅助调压室进行联合防护以减小调压室面积。串联多调压室布置即在输水系统管线多处增设调压室,在输水工程中已经得到广泛应用。但无论是单调压室还是串联多调压室,各调压室阻抗孔径的选取对水锤防护效果均有较大的影响,因此在选取调压室阻抗孔径时,需要进行详细分析。本文结合工程算例,基于瞬变流计算的特征线法进行一维数值模拟计算,对比分析了单阻抗调压室和串联多阻抗调压室两类防护措施的水锤防护效果,验证了后者的优越性,同时针对两种布置情况下调压室阻抗孔径的选取进行了系统的优化研究。

1 算例数值模拟

本文以粤东三江连通引水工程为研究对象,该工程取水口水位-1.4 m,出水池水位 23.5 m,管材为 DN4300 钢筋混凝土,全长约 27 km,稳态工况如图 1 所示(图中 H 、 h 、 L 分别为测压管水头、管中心线高程和泵后的距离),利用 6 台设计扬程为 44.59 m 的单级双吸离心泵加压输水,输水流量 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 。泵站机组抽水掉电后,要求管线留有 2 m 压力(本文压力均以水头表示)安全裕量。

水泵抽水掉电且泵后阀拒动,若全线无水锤防护措施,由图 2 Fig.1 Water head line and tube centerline elevation of piezometric tube (图中 H 、 Q 、 t 分别为泵后压力、泵后流量和时间)可知,泵后产生约 47 m 降压,水锤波以约 800 m/s 波速向泵后管线传播,掉电一个相长(约 68 s)后出水池反射的升压波使泵后压力上升,水体约 138 s 后发生倒流,最大反转速度达 503.57 r/min 。由图 3(图中 H_{in} 为管道内压力水头)可知,泵后管线几乎都产生严重负压,桩号 23+000 处负压最大,达 -33.64 m (压力低于 -10 m 时,水体已发生汽化,图 3 中低于 -10 m 的压力仅代表负压的严重程度),这是因为泵后降压速率快且该段管道初始压力小导致出水池反射降压波能力差,向前防护距离短。

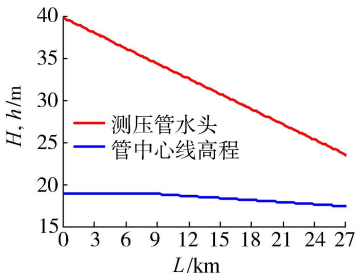


图 1 测压管水头线和管中心线高程

Fig.1 Water head line and tube centerline elevation of piezometric tube

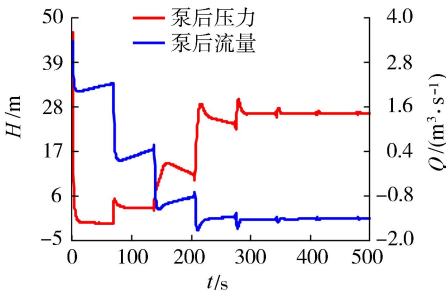


图 2 无防护水泵抽水掉电泵后压力与泵后流量变化过程

Fig.2 Change processes of pressure and discharge behind pump with unprotected power-down

1.1 单阻抗调压室模拟结果

调压室面积越大,调压室水位和管线压力也越大,为保证输水系统安全,初步拟定在泵站出口设调压室防护停泵水锤,设计了 3 种调压室防护方案,调压室体型参数和涌浪压力计算结果如表 1 所示。

水泵抽水掉电后,泵后调压室的水体瞬间向泵前倒流,为了充分发挥调压室的调节性能,设计泵后蝶阀采用 15 s 一段直线快速关闭。由方案 1 与方案 3 相比可知,通过在简单式调压室底部设置直径较小的阻抗孔可

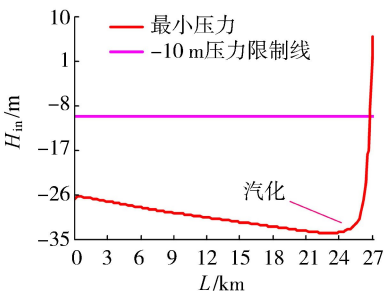


图 3 无防护水泵抽水掉电管线最小压力包络线

Fig.3 Envelope curves of minimum pressure along pipeline for the pump with unprotected power-down

表 1 单阻抗调压室体型参数和涌浪压力计算结果

Table 1 Shape parameters and calcution results of surge pressure and of single surge chamber

方案	阻抗 孔径/m	截面积/ m ²	最低 涌浪/m	管线最小 压力/m
1	6.0	900	20.91	1.98
2	1.0	300	21.63	-24.52(汽化)
3	2.4	850	20.99	2.05

以在保证调压室安全水深裕量和管线最小压力相差不大的同时有效减小调压室的截面积约6%。这是因为减小底部阻抗孔径能提高最低涌浪,使管线最小压力增大,故可对截面积进行缩减。方案2说明减小阻抗孔径可以大幅减小截面积且保证最低涌浪较大,但随着阻抗孔径减小,底部阻抗损失增大,加上水泵抽水掉电后巨大的降压波使得水位迅速下降,导致底部瞬时降压很大,调压室防护距离缩短,泵后管线压力迅速下降,管线初始压力较小处降至汽化压力,造成“水击穿室”,故单阻抗调压室防护方案存在最优阻抗孔径的选取。如图4、图5所示,截面积 S 一定(850 m^2),阻抗孔径 d 过小可以增大最低涌浪 $Z_{\min}$,但会造成“水击穿室”,使得管线末端初始压力较小的地方出现严重负压;当阻抗孔径增大至 2.4 m 时,管线最小压力最大,继续增大阻抗孔径,最低涌浪下降将导致底部压力降低。最优阻抗孔径的选取可先采用调压室涌浪波动振幅公式对调压室面积进行估算,然后试算阻抗孔径使得管线最小压力满足要求的同时保证调压室最低涌浪满足要求。

1.2 串联多阻抗调压室模拟结果

1.2.1 计算结果对比

水泵抽水掉电后,水锤波衰减较快,但在很长一段时间内由于水体惯性的存在,仍会产生较大的涌浪降幅,与方案3相比,增大调压室的面积(如方案4)能使调压室水位下降变慢,增大最低涌浪,使得管线最小压力增加,但面积显著增大。此时可在主调压室后增设辅调压室(桩号7+800处)进行防护。本文在设有调压室防护措施且泵后阀15 s一段直线关闭规律的基础上,为了有效防护负水锤并优化调压室体型,又设计了防护方案4和防护方案5进行对照(表2)。由表2可知,采用串联双阻抗调压室可在保证最低涌浪较大的同时提高管线最小压力,并大幅度减小总面积,可由 $1\,000\text{ m}^2$ 缩减至 690 m^2 ($220\text{ m}^2+470\text{ m}^2$)。

表2 串联多阻抗调压室体型参数和涌浪压力计算结果

Table 2 Shape parameters and calcution results of surge pressure of series throttled surge chambers							
方案	调压室数量	主调压室 阻抗孔径/m	主调压室 截面积/ m^2	辅调压室 阻抗孔径/m	辅调压室 截面积/ m^2	主调压室 最低涌浪/m	管线最小 压力/m
4	1(单阻抗调压室)	2.4	1 000			21.37	2.43
5	2(串联双阻抗调压室)	1.8	220	1.4	470	21.50	2.55
6	3(串联三阻抗调压室)	1.8	170	1.0,1.2	220,220	21.64	2.69

1.2.2 串联多阻抗调压室联合防护机理

由图6、图7可知,串联双阻抗调压室之所以可以取得比单阻抗调压室更好的水锤防护效果,是因为串联双阻抗调压室可以加强反射水锤波,增大调压室对管线的 水锤防护距离,水流在流经两个阻抗孔时都损耗了能量,加速了涌浪波动衰减,提高了稳定水位的能力。两个调压室的涌浪波动相互制约,使得涌浪降幅大幅度减小,调压室最低涌浪和管线最小压力大幅提升,故串联双阻抗调压室(方案5)所需总面积可以远比单阻抗调压室(方案4)小。以此类推,串联三阻抗调压室(方案6)的水锤防护计算结果(在桩号4+000处增设一个辅调压室)如表2、图6(图中 Z 为主调压室水位)和图7所示,相比于串联双阻抗调压室,串联三阻抗调压室在选取了合适的阻抗孔径后,可以在保证总面积由 690 m^2 ($220\text{ m}^2+470\text{ m}^2$)缩减至 610 m^2 ($170\text{ m}^2+220\text{ m}^2+220\text{ m}^2$)的情况下,取得更好的水锤防护效果,有效提升调压室最低涌浪和管线最小压力,降低工程造价。由此可以类推,随着管线阻抗调压室数量的增加,串联多阻抗调压室的优越性将愈发明显。同单阻抗调压室防护类似,串联多阻抗调压室亦存在最优的阻抗孔径,可保证调压室最低涌浪和管线最小压力最大并有效减小调压室的总截面积。

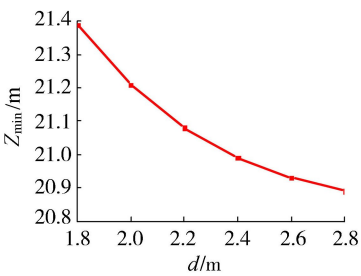


图4 阻抗孔径对最低涌浪的影响
Fig.4 Effect of impedance hole apertures on minimum surge

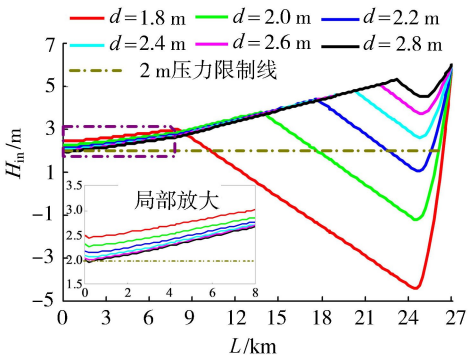


图5 阻抗孔径对管线最小压力包络线的影响
Fig.5 Effect of impedance hole apertures on envelope curves of minimum pressure along pipeline

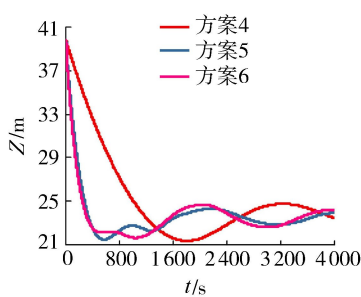


图 6 不同防护方案主调压室水位变化

Fig. 6 Water level change of principal surge chambers under different protection schemes

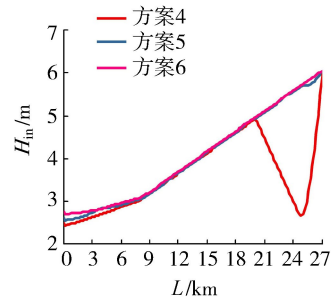


图 7 不同防护方案管线最小压力包络线

Fig. 7 Envelope curves of minimum pressure along pipeline under different protection schemes

2 串联双阻抗调压室的参数优化

串联多阻抗调压室与串联双阻抗调压室类似,本文以串联双阻抗调压室为例分析调压室参数对调压室水锤防护效果的影响。串联双阻抗调压室的压力波动较为复杂,两个调压室面积和阻抗孔径的选取对防护效果影响很大,选取合适的阻抗孔径可以取得更好的水锤防护效果,在保证调压室最低涌浪和管线最小压力较大的同时使调压室面积大幅减小,故对串联双阻抗调压室阻抗孔径的选取进行研究是非常有必要的。在确定主、辅调压室数量和位置后,主、辅调压室面积和阻抗孔径对主调压室最低涌浪和管线最小压力的影响计算结果如图 8 和图 9 所示(图中 D_1 、 D_2 分别为主、辅调压室的直径, d_1 、 d_2 分别为主、辅调压室的阻抗孔径, $H_{\min}$ 为管线最小压力)。

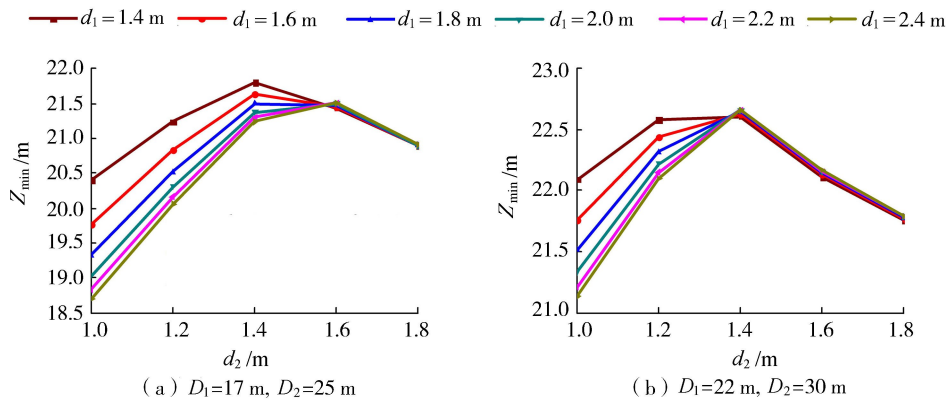


图 8 阻抗孔径对主调压室最低涌浪的影响

Fig. 8 Effect of impedance hole apertures on minimum surge of principal surge chamber

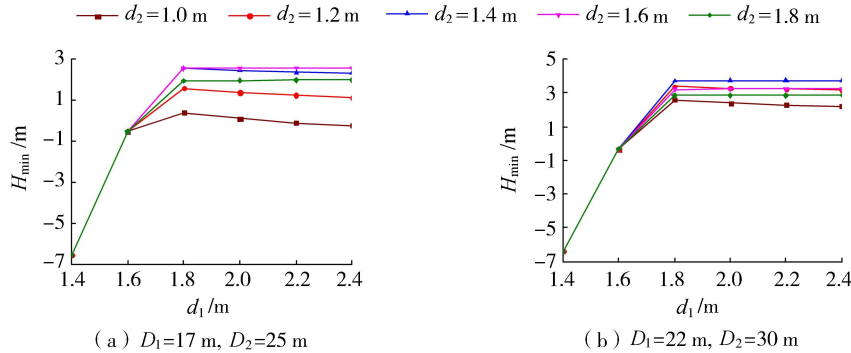


图 9 阻抗孔径对管线最小压力的影响

Fig. 9 Effect of impedance hole apertures on minimum pressure along pipeline

由图 8、图 9 可知,采用串联双阻抗调压室防护时,面积越大,输水系统调压室最低涌浪和管线最小压力也越大,主、辅调压室均存在最优阻抗孔径的选取。

2.1 主调压室阻抗孔径选取

主调压室因设置在泵后,由图8、图9可知,主调压室阻抗孔径 d_1 过小虽然可以增大主调压室最低涌浪,但会造成“水击穿室”,此时管线最小压力主要受 d_1 的控制,管线最小压力较低,随着 d_1 增大,主调压室最低涌浪下降,但底部阻抗瞬时降压降低,主调压室的“穿室”作用减弱,管线最小压力显著提升,管线最小压力逐渐受主调压室最低涌浪控制;当 d_1 增大至1.8 m时,管线最小压力最大,继续增大 d_1 ,受主调压室最低涌浪降低影响,管线最小压力逐渐下降,但随着辅调压室阻抗孔径 d_2 增大,主、辅调压室间底部压差变小,该水力特性逐渐消失。因此在设计 d_1 时应保证在不发生“水击穿室”的同时尽可能减小 d_1 以保证主调压室具有富余的安全水深。此外,当泵后阀关闭规律确定以后,增大主调压室阻抗孔径将导致在泵后阀关闭期间加大水体倒流流量,使主调压室水位下降,增大泵后阀关闭期间产生的关阀水锤和水泵倒转转速,因此对给定的泵后阀关闭规律来说,亦存在较优调压室阻抗孔径的选取。

2.2 辅调压室阻抗孔径选取

由图8、图9可知,随着辅调压室阻抗孔径 d_2 增大,主调压室最低涌浪和管线最小压力上升, d_2 为1.4 m时主调压室最低涌浪最高,受主调压室最低涌浪控制,管线最小压力也最大,继续增大 d_2 ,主调压室最低涌浪和管线最小压力呈下降趋势。这是因为随着 d_2 增大,辅调压室水位降低,但底部阻抗压差显著下降,根据水头平衡方程,辅调压室底部压力增大,与主调压室底部压力之间的压差减小,使得主调压室最低涌浪和管线最小压力增大; d_2 增大至1.4 m时主调压室最低涌浪和管线最小压力最大,继续增大 d_2 ,辅调压室水位将加速下降,底部压力降低,与主调压室底部压力之间压差变大,使得主调压室最低涌浪逐渐下降,管线最小压力降低,该特性可由图10中 $D_1=17\text{ m}$ 、 $D_2=25\text{ m}$ 、 $d_1=1.8\text{ m}$ 情况下的3条水位变化过程线得以验证。由图10可以看出, d_2 较小时,主调压室水位呈迅速下降趋势, d_2 较大时,主调压室水位则缓慢下降,故在对 d_2 进行选择分析时实际上就是在主调压室水位迅速下降与缓慢下降两种水位变化过程中寻找一个平衡点使得主调压室最低涌浪最高以保证管线最小压力最大。

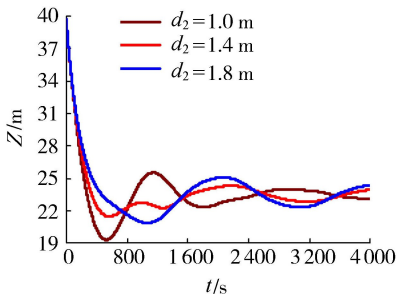


图10 辅调压室阻抗孔径对主调压室水位的影响

Fig. 10 Effect of impedance hole aperture of secondary surge chamber on water level of principal surge chamber

由以上计算分析可以证明主、辅调压室均存在最优阻抗孔径,可通过试算得到。先通过涌浪公式估算主、辅调压室的截面尺寸,试算得出主调压室的最优阻抗孔径 d_1 ,在保证不发生“水击穿室”的情况下再对辅调压室的阻抗孔径 d_2 进行试算。在主、辅调压室均选取最优阻抗孔径后,串联双阻抗调压室可取得最佳的水锤防护效果,显著提升调压室最低涌浪和管线最小压力,大幅度减小调压室截面尺寸。该结论也适用于串联多阻抗调压室,即在串联多阻抗调压室布置系统中,各调压室均存在最优阻抗孔径。

3 结 论

- a. 单调压室防护方案中,在保证不发生“水击穿室”的情况下,在调压室底部设置直径较小的阻抗孔可以保证较大的安全水深和管线最小压力,有效减小调压室面积。
- b. 相比于单阻抗调压室防护方案,串联多阻抗调压室水锤防护效果更佳,可以加强对水锤波反射,加速涌浪波动衰减,提高管线最小压力和调压室最低涌浪,故在长距离输水系统中,串联多阻抗调压室布置总面积要远小于单阻抗调压室。随着管线阻抗调压室数量的不断增加,串联多阻抗调压室的优越性愈发明显。
- c. 串联多阻抗调压室布置系统中,调压室面积越大,输水系统调压室最低涌浪和管线最小压力也越大,主、辅调压室均存在最优阻抗孔径的选取,使得调压室的最低涌浪和管线最小压力最大以满足输水系统的运行要求并大幅度减小调压室截面尺寸。

参考文献:

[1] 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, ZAHNG 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))
- [2] 张健,黎东洲,结少鹏,等.考虑摩阻的停泵水锤传播公式[J].水力发电学报,2015,34(9):92-97. (ZHANG Jian, LI Dongzhou, JIE Shaopeng, et al. Pump failure water hammer propagation formula considering friction in long-distance water supply system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(9): 92-97. (in Chinese))
- [3] 石林,张健,倪尉翔,等.具有特殊地形条件的长距离供水工程水锤防护[J].水力发电学报,2019,38(5):81-88. (SHI Lin, ZHANG Jian, NI Weixiang, et al. Water hammer protection for long-distance water supply projects with special terrain conditions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 81-88. (in Chinese))
- [4] STOKES Y M, MILLER A, HOCKING G. Pressure drop in pipelines due to pump trip event[J]. Anziam Journal, 2015, 57: 163-204.
- [5] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSSSELING A S. Water hammer with column separation: a historical review[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2): 135-171.
- [6] 马世波,张健.长距离输水工程停泵水锤防护措施研究[J].人民长江,2009,40(1):85-86. (MA Shibo, ZHANG Jian. Study on the protection measures of stopping pump water hammer in long-distance water transmission project[J]. Yangtze River, 2009, 40(1): 85-86. (in Chinese))
- [7] 张健,朱雪强,曲兴辉,等.长距离供水工程空气阀设置理论分析[J].水利学报,2011,42(9):1025-1033. (ZHANG Jian, ZHU Xueqiang, QU Xinghui, et al. Arrangement of air-valve for water hammer protection in long-distance pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1025-1033. (in Chinese))
- [8] 张健,索丽生,胡建永,等.长距离供水单向塔设置分析[J].水力发电学报,2011,30(1):49-56. (ZHANG Jian, SUO Lisheng, HU Jianyong, et al. Study on water hammer control by one-way surge tank in longdistance water-supply project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 49-56. (in Chinese))
- [9] 邓安利,蒋劲,兰岗,等.长距离输水工程停泵水锤的空气罐防护特性[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):402-406. (DENG Anli, JIANG Jin, LAN Gang, et al. Research on protective properties of air vessel for pump-stopping water hammer protection of long distance pipelines[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3): 402-406. (in Chinese))
- [10] 诸葛妃,张健.长距离输水设置超压泄压阀水力过渡过程分析[J].水利水电技术,2010,41(12):35-37. (ZHU Gefei, ZHANG Jian. Analysis on hydraulic transient process of over-pressure relief valve for long distance water conveyance facility[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(12): 35-37. (in Chinese))
- [11] 朱雪强,张健,曹东磊,等.单向调压塔与稳压塔联合设置对水锤的防护研究[J].人民长江,2009,40(11):70-72. (ZHU Xueqiang, ZHANG Jian, CAO Donglei, et al. Study on the protection of water hammer by the combination of one-way surge and surge[J]. Yangtze River, 2009, 40(11): 70-72. (in Chinese))
- [12] MIAO Di, ZHANG Jian, CHENG 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.
- [13] 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].排灌机械工程学报,2019,37(5):406-412. (WANG Siqi, YU Xiaodong, NI Weixiang, et al. Water hammer protection combined with air vessel and surge tanks in long-distance water supply project[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 406-412. (in Chinese))
- [14] 童祥,张晓宏,张俊发.调压室阻抗孔尺寸选择的研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):168-171. (TONG Xiang, ZHANG Xiaohong, ZHANG Junfa. Research on the size selection of impedance hole of surge chamber for hydropower station[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(4): 168-171. (in Chinese))
- [15] 陈岚,赖旭,邹金.上游串联双调压室系统稳定断面面积设计[J].水电能源科学,2016,34(4):54-57. (CHEN Lan, LAI Xu, ZOU Jin. Stable section area design of hydropower station with upstream series double surge chambers[J]. Water Resource and Power, 2016, 34(4): 54-57. (in Chinese))
- [16] 张帅,张晓宏,张俊发.上游串联双调压室系统合理尺寸选择的研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):172-176. (ZHANG Shuai, ZHANG Xiaohong, ZHANG Junfa. Research on the reasonable size selection of upstream series double surge chambers for hydropower station[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(4): 172-176. (in Chinese))
- [17] 张健,于德爽,安建峰.气垫调压室临界稳定断面计算参数取值讨论[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(1):6-10. (ZHANG Jian, YU Deshuang, AN Jianfeng. Selection of parameters for calculating critical stability cross-sectional area of air-cushion surge chambers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(1): 6-10. (in Chinese))
- [18] 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. (ZHOU Jianxu, SHAO Weihong, HUANG Xiaotong, et al. Stability analysis of long-distance water diversion-type hydropower station with parallel surge chambers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(2): 159-164. (in Chinese))