

压力钢管爆管对并联调压室水电站瞬变流的影响

乔艳伟¹,周建旭¹,结少鹏²,张松磊¹,刘俊平¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310002)

摘要:为了研究水电站压力钢管爆管的特殊水力瞬变特性及其对运行机组的影响,建立压力钢管爆管计算模型,结合设置并联调压室的水电站,开展了明钢管爆管的瞬变流分析,研究了不同爆管特征断面和爆管孔口面积下水力-机械系统的水力参数特征。结果表明:水电站压力钢管爆管的瞬变特性与爆管位置及爆口面积大小密切相关;爆管支路的流量和压力发生剧烈变化,引起机组蜗壳失压、引水调压室漏空等典型事故现象;爆管支路蝶阀的关闭控制和并联调压室的存在,可以有效降低对并联支路和运行机组的影响。

关键词:水电站;压力钢管;明钢管;爆管;并联调压室;瞬变流

中图分类号:TV134;TV732.4⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)02-0057-05

Investigation of fluid transients in the hydropower station with parallel surge chambers under pressurized steel pipe burst//QIAO Yanwei¹, ZHOU Jianxu¹, JIE Shaopeng², ZHANG Songlei¹, LIU Junping¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: In order to study the special hydraulic transient characteristics of pressurized steel pipe burst in hydropower stations and their influence on operating units, the mathematical simulation model of pressurized steel pipe burst was built and the hydropower station with parallel surge chambers was set. Based on that, this paper analyzed the fluid transients of exposed pressurized pipe burst and investigated the hydraulic parameters in the hydro-mechanical system with different burst characteristic sections and different burst areas. The results showed that there is a strong connection between the transient characteristics of pressurized steel pipe burst in hydropower stations and the burst position and its area as well. Additionally, the severe changes of flow and pressure of the pipe burst branch may lead to some typical phenomenons including instantaneous loss of pressure at spiral case and water empty in the upstream surge chamber. Finally, it is also showed that the effect of pipe burst along one branch on the paralleled branch and the operating unit is alleviated when the butterfly valve of the branch and the parallel surge chambers are closed.

Key words: hydropower station; pressurized steel pipe; exposed pipe; pipe burst; parallel surge chamber; fluid transients

引水式水电站是全部或主要由引水系统集中水头和引用流量以开发水能的水电站,压力钢管是引水式水电站引水系统的重要组成部分,在保证水电站安全可靠运行中发挥着关键的作用^[1]。压力钢管在运行中承受相对较大的内水压力,一旦出现大位移、爆裂、塌陷等事故^[2],将直接危及下游侧厂房的运行安全,而压力钢管爆管是水电站明钢管典型的事故现象,会直接影响水电站的安全稳定运行。水电站压力钢管爆管过程属于典型的水电站水力-机械系统瞬变流过程,国内外在水电站水力-机械系统瞬变流分析方面开展了系统而深入的研究^[3-5],而涉及水电站压力钢管爆管问题的研究相对较少,且

主要以分析爆管原因、预防控制措施为主^[6-10]。水电站常用的调压室布置形式包括上游调压室、下游调压室、上下游双调压室和上游双调压室等形式^[1],而设置并联调压室的较少,而关于并联调压室水电站压力钢管爆管下系统瞬变流特性的研究则明显不足。与典型的机组增荷或甩荷过渡过程相比,压力钢管爆管是一个更为复杂而剧烈的瞬变流过程,爆管处的压力水头在爆管瞬时急剧下降,导致整个有压输水系统内流量和压力都发生剧烈变化,主要表现为机组蜗壳进口瞬时失压、引水调压室和上游压力管道漏空等典型的事故现象。对于设置并联调压室且压力钢管较长的水电站而言,压力钢管

沿线可能发生爆管的特征断面较多,爆管引起的瞬变流现象对运行机组的影响复杂,因此,本文在分析压力钢管爆管的水力特性基础上建立爆管的节点计算模型,对明钢管爆管进行了模拟,并对爆管瞬变流特性及其对机组运行稳定性的影响进行了分析,从而为水电站的安全稳定运行奠定基础。

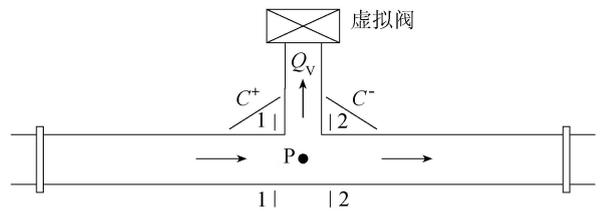


图1 基于管道虚拟阀的爆管水力模型

1 压力钢管爆管的水力特征分析

产生压力钢管爆管事故的原因复杂多样,且爆管历时很短,爆管时引起的水锤压力变化通常按直接水锤考虑。理论上对于明敷管道,爆管后爆管点处的压力为当地大气压,实际上由于爆口局部水头损失、爆管孔口大小和爆管时间等影响因素的存在,爆管点压力降低是一个较快的瞬变过程。

水电站有压输水系统正常运行期间压力管道内水压力较大,在爆管瞬间,爆管处的压力水头急剧下降,产生剧烈的降压波,并且向上下游传递,使沿线压力均产生大幅下降,整个有压输水系统内水压力和流量均发生剧烈变化。由于爆管点上游地势较高,内水压力相对较小,爆管后,爆管点上游管道可能出现较大的负压,下游也将产生剧烈的压力振荡,机组蜗壳进口瞬时失压。

压力钢管爆管后,水电站水力-机械系统产生复杂的瞬变流过程,破坏系统及机组原有的稳定运行状态,为了保证机组及设备的安全,相应机组需要甩负荷并停机,同时,可能影响相邻机组的运行稳定性,甚至停机,需要采取相应的运行控制措施,包括紧急关闭爆管点上游侧事故闸门或蝶阀(若设置蝶阀),以尽可能降低压力钢管局部爆管对系统整体的不利影响。

2 基于阀出流的明钢管爆管节点模型

基于以上爆管现象的分析,以管道虚拟阀作为模拟明钢管爆管孔口出流的水力计算分析模型^[11-12],如图1所示,来替代爆管孔口和模拟明钢管爆管下爆管点的水流过程。当压力钢管正常运行时,虚拟阀处于完全关闭的状态;当压力钢管某特征断面爆管时,形成爆管孔口P,相应的虚拟阀瞬时打开,其中爆管孔口的当量直径可近似确定,在计算中可取不同的爆口当量直径进行敏感性分析。对于拟定的爆管孔口P,爆管孔口的局部水头损失 Δh 是流量的单值函数。连接阀门的支管的长度取决于压力钢管的埋藏深度和地质地形条件,对于明钢管而言,可不考虑其长度,近似忽略其水头损失。

利用孔口出流方程^[11-14]模拟明钢管爆管的瞬变流过程,控制方程为

$$Q_V = C_d A_G \sqrt{2gH_V} \quad (1)$$

式中: Q_V 为爆口的过流量, m^3/s ; C_d 为孔口流量系数; A_G 为爆管孔口面积, m^2 ; H_V 为爆管孔口的作用水头, m (考虑到爆管孔口出水侧即为自由出口, H_V 即为爆管孔口压力钢管侧的内水压力)。

爆管点处管道的相容性方程为

$$C^+ : H_P = C_P - B_P Q_{P1} \quad (2)$$

$$C^- : H_P = C_M + B_M Q_{P2} \quad (3)$$

爆管点处满足流量平衡条件,即

$$Q_{P1} = Q_{P2} + Q_V \quad (4)$$

不考虑连接管处的局部水头损失,有

$$H_P = H_V + H_V \quad (5)$$

式中 H_V 为爆管点的高程。

记 $R_k = \frac{1}{2gC_d^2 A_G^2}$,联立式(1)~(5),可得

$$Q_V = \frac{-1 + \sqrt{C_3}}{2C_2 R_k} \quad (6)$$

其中

$$C_1 = \frac{C_P}{B_P} + \frac{C_M}{B_M}$$

$$C_2 = \frac{1}{B_P} + \frac{1}{B_M}$$

$$C_3 = 1 - 4C_2 R_k (C_2 H_V - C_1)$$

通过公式(6)求出虚拟阀出口流量,即爆管孔口流量 Q_V 后,可求出其他水力参数的瞬时值。

基于有压输水管道瞬变流分析的特征线法^[3-4],并考虑输水系统中各水力元件节点处的水头和流量平衡条件,以及水轮机组的能量和效率特性,结合系统中各边界条件的分析模型,引入阀出流的明钢管爆管的节点模型,则可建立爆管瞬变流分析的计算模型,开展压力钢管爆管的瞬变流及其影响分析。

3 设置并联调压室的水电站爆管影响分析

以某水电站输水系统为例,进行压力钢管爆管过渡过程计算,分析压力钢管爆管对水电站瞬变流的影响。图2和图3为该水电站输水系统平面布置和爆管支路压力管道纵剖面布置简图,设置了并联阻抗式调压室且压力钢管较长,每根支管上游侧分别布置蝶阀,调压室下游侧双线压力钢管明钢管分别长2.34 km和2.32 km^[15],包括洞内明钢管和露

天明钢管,布置起伏较大,近厂房段为坡度较大的露天明钢管。运行过程中,压力钢管承受较大的内水压力且局部承受较大的不平衡力,可能的爆管点分布较为广泛,在一些不利的运行条件下可能发生压力钢管爆管事故,引起复杂的瞬变流过程,严重影响系统的正常运行。

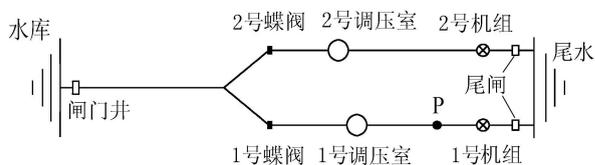


图2 输水系统平面布置简图

3.1 系统参数和控制工况

图2所示水电站的主要参数如下:并联调压室阻抗孔直径3.0 m,竖井有效面积 30.175 m^2 ;机组额定流量 $115.6\text{ m}^3/\text{s}$,设计水头430.74 m,机组转动惯量 $10\ 130\text{ t}\cdot\text{m}^2$,机组导叶采用直线关闭规律, $T_s=15.0\text{ s}$;蝶阀采用直线紧急关闭规律, $T_{sv}=60\text{ s}$ 。控制工况如下:

a. 爆管工况(B1):水库正常蓄水位1756.00 m,两机额定水头额定出力运行,1号机组所在压力钢管突发爆管事故,1号蝶阀紧急关闭,正常运行的2号机组在调压室水位最高时甩负荷,导叶正常关闭。

b. 不爆管工况(B2):水库正常蓄水位1756.00 m,两机额定水头额定出力运行,1号机组甩负荷,正常运行的2号机组在调压室水位最高时甩负荷。

3.2 压力钢管爆管的瞬变流计算分析

压力钢管爆管时,爆管产生的瞬变流过程与爆管点的位置、爆管孔口大小、爆管点位置管径等因素有关^[14],不同的爆管点和不同的爆口面积对系统水力瞬变特性的影响也不完全相同。

爆管工况,在 $t=10\text{ s}$ 时,1号机组支管发生爆管事故,采用阀门孔口出流控制方程对该爆管工况进行详细的瞬变流计算分析。爆管产生后,因蝶阀及导叶的关闭,调压室及压力钢管将出现漏空现象,因此,侧重于对爆管支路调压室水位降至底板高程之前的水力瞬变流及其影响进行分析。

3.2.1 不同爆管点的瞬变特性

因不同爆管点的初始内水压力和高程不同,爆管后引起的瞬时压降不同,同一爆口面积下不同爆管点爆管对有压输水系统的瞬变流特性的影响不同。考虑爆口当量直径为1.5 m,如图3所示,分别对P1、P2、P3点爆管进行详细的爆管瞬变流分析,结果见图4~7,表1给出了爆管口主要水力参数、相邻2号支路调压室水位和机组蜗壳进口内水压力的特征值。

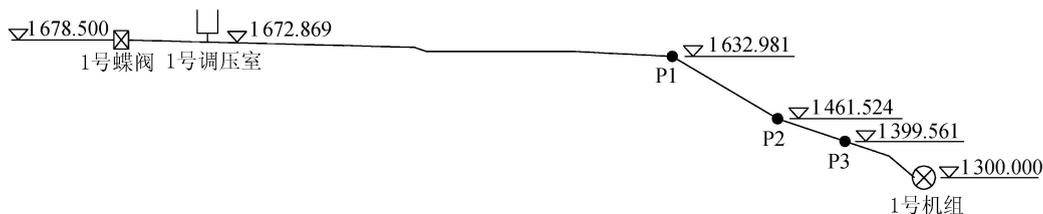


图3 爆管支路压力管道纵剖面布置简图(单位:m)

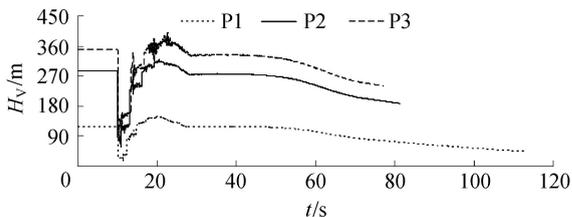


图4 1号支管不同爆管点处的压力变化过程线

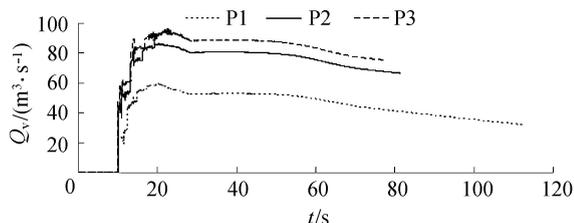


图5 1号支管不同爆管点处的爆口涌出流量变化过程线

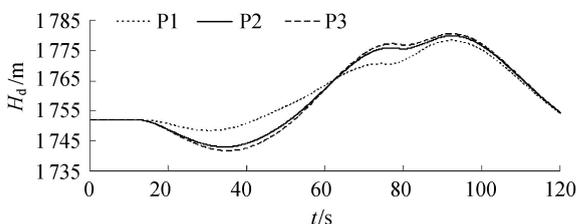


图6 不同爆管点爆管时2号并联支路引水调压室水位变化过程线

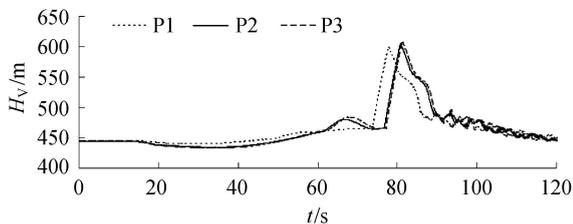


图7 不同爆管点爆管时2号并联支路机组蜗壳进口内水压力变化过程线

表1 不同爆管点主要水力参数的特征值

爆管点位置	爆管点最大内水压力/m		爆管点爆管瞬时压降/m	爆管点最大涌出流量/(m ³ ·s ⁻¹)	2号调压室最高涌浪水位/m		2号蜗壳进口最大内水压力/m		2号蜗壳进口最小内水压力/m	
	B1	B2			B1	B2	B1	B2	B1	B2
	P1	149.29			188.28	92.40	59.28	1778.27	1775.53	599.38
P2	318.78	379.47	201.99	86.63	1779.86	1775.53	605.98	598.47	434.51	442.57
P3	399.85	453.64	251.88	97.02	1780.38	1775.53	607.90	598.47	432.97	442.57

注:内水压力用压力水头表示,表2同。

分析图4~7和表1可知:

a. 压力钢管爆管后,爆管点压力瞬时降低,爆管孔口涌出流量瞬时增大。对于同一爆口面积不同爆管点,爆管时均出现了严重的瞬时压降,且爆管点高程越低瞬时压降越大。高程最低的P3点爆管时,压降和涌出流量较大,压力钢管沿线出现了不同程度的严重负压现象,下游机组蜗壳失压亦最为严重。对负压现象可进一步采用适于水汽两相流模拟的数值分析算法进行仿真研究。因输水系统沿线布置起伏较大,压力管道特性多样,爆管点以及输水系统沿线压力产生剧烈的振荡。随着相应爆管支路蝶阀的关闭,机组导叶也关闭,上游压力钢管内水流逐渐减少,调压室水位持续下降,直至漏空,且爆管点不同,调压室漏空时间不同。随着上游蝶阀的关闭,爆口的流量逐渐减小,爆管点的压力随着调压室水位的降低逐渐减小。

b. 考虑到蝶阀的关闭切断了爆管支路对并联支路的影响,以及并联调压室对爆管影响的减缓作用,削弱了爆管产生的降压波对蝶阀上游及并联支路的影响。1号支路爆管后,受蝶阀关闭时间的影响,对2号并联支路机组导叶关闭后相应的调节保证计算参数有一定的影响。1号支路爆管点位置越低,爆管点上游侧支管和主管道流量增量越大,蝶阀关闭后,对2号机组支路的影响也越明显,主要表现为2号调压室最高涌浪水位较高,2号机组蜗壳进口最大内水压力较大。

c. 与不爆管工况相比,爆管工况下,爆管点最大内水压力及2号机组蜗壳进口最小内水压力均明显降低,而2号调压室最高涌浪水位及2号机组蜗壳进口最大内水压力有所增大。

3.2.2 同一爆管点不同爆口面积的瞬变特性

以爆管点P2为例,爆口当量直径分别取1.0m、

表2 不同爆管面积主要水力参数的特征值

爆管点爆口当量直径/m	爆管点最大内水压力/m		爆管点爆管瞬时压降/m	爆管点最大涌出流量/(m ³ ·s ⁻¹)	2号调压室最高涌浪水位/m		2号蜗壳进口最大内水压力/m		2号蜗壳进口最小内水压力/m	
	B1	B2			B1	B2	B1	B2	B1	B2
	1.0	387.78			379.47	124.23	42.47	1776.70	1775.53	593.43
2.0	286.95	379.47	246.81	142.31	1782.90	1775.53	622.43	598.47	420.37	442.57
3.0	286.95	379.47	276.97	249.45	1787.37	1775.53	629.12	598.47	402.17	442.57

2.0m、3.0m,对爆管瞬变特性进行分析,结果见表2。

分析表2可知:

a. 对于同一爆管点,爆口面积越大,爆管引起的瞬时压降越大,引起沿线压力钢管出现越大的负压,亦可采用适于水汽两相流模拟的数值算法进行进一步分析。爆口面积较小时,瞬时压降相对较小,爆管点最大压力较大;爆口面积较大时,爆口局部阻抗系数较小,同时涌出流量较大,内水压力变化趋势较为平缓。随着相应支路蝶阀的关闭,调压室水位下降,爆口面积越大,调压室漏空时间越早,甚至在蝶阀还没完全关闭时就已漏空,可能引起上游管道进气,引发二次事故。

b. 爆管支路蜗壳出现了严重失压现象,由于并联调压室的缓冲作用和上游蝶阀的关闭控制,对相邻2号并联支路调压室最高涌浪及蜗壳进口最大内水压力的影响得以减轻。随着爆管支路爆管孔口面积的增大,爆管点上游侧压力钢管和主管道流量增量亦增大,蝶阀关闭后,对2号机组支路的影响也较明显,并联支路最高涌浪、蜗壳进口最大内水压力均增大。

c. 与不爆管工况相比,2号调压室最高涌浪水位均有所升高,当爆口当量直径较小时爆管点最大内水压力较不爆管工况大,2号机组蜗壳进口最大内水压力较不爆管工况小,随着爆口当量直径加大,爆管点最大内水压力过渡为较不爆管工况小,蜗壳进口最大内水压力过渡为较不爆管工况大,2号支路相应的调节保证计算参数大于不爆管工况。

4 结论

a. 水电站压力钢管爆管过渡过程是一个复杂的非恒定流过程。压力钢管爆管后,爆管点出现剧烈的瞬时压降和较大的涌出流量,致使所在支路的

压力和流量发生剧烈变化,压力管道局部可能出现严重负压,引发二次爆管事故。

b. 压力钢管爆管产生的瞬变流特性及其影响不仅与爆管位置、爆管孔口大小有关,还与压力钢管的运行控制有关。爆管支路蝶阀的关闭控制和并联调压室的存在,可以有效降低某一支路压力钢管爆管对并联支路及相应机组的影响。

c. 爆管主要表现为机组蜗壳进口瞬时失压、引水调压室和上游压力管道漏空等典型的事故现象。爆管点位置及爆口大小不同,调压室漏空时间不同。对于较大爆口或高程较低的爆管点,瞬时压降较大,上游压力管道流量增加较大,对相邻并联机组的影响较大,可以考虑蝶阀关闭规律的优化,以有效控制压力钢管爆管的影响。

d. 压力钢管爆口当量直径较大,爆管点地势较低或靠近下游机组时,压力钢管沿线可能出现严重的水汽两相流现象,常用的有压输水系统瞬变流分析的特征线法不适于准确揭示相应的瞬变流特性,可以采用适于水汽两相流模拟的数值分析算法开展进一步的研究。

参考文献:

[1] 王仁坤,张春生. 水工设计手册:第8卷 水电站建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012:169-242.

[2] 刘扬. 小型水电站长压力钢管设计参数的合理选择[C]//福建省水利学会青年学术工作委员会. 福建省第九届水利水电青年学术交流会论文集. 福州:福建省水利学会,2005:133-139.

[3] 郑源,张健. 水力机组过渡过程[M]. 北京:北京大学出版社,2008:13-76.

[4] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Lisheng. Fluid transients in systems[M]. Englewood, New Jersey: Prentice Hall, 1993.

[5] 何文学,李茶青. 水电站大波动过渡过程研究现状及发展趋势[J]. 水利水电科技进展,2003,23(4):58-61. (HE Wenxue, LI Chaqing. The research advance and trend analysis on the big fluctuation transient condition of a hydropower station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(4): 58-61. (in Chinese))

[6] 亚当·亚当科夫斯基,马元珽. 波兰 Lapino 水电站压力钢管破裂的调查和分析[J]. 水利水电快报,2002,23(6):1-3. (ADAM Adam khodorkovsky, MA Yuaning. Investigation and analysis on pressured steel pipe failure Poland Lapino hydropower station [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2002, 23(6): 1-3. (in Chinese))

[7] 钟秉章. 响水水电站压力钢管事故剖析[C]//贵州省

科学技术协会. 第六届全国水电站压力管道学术论文集. 北京:中国水利水电出版社,2006:46-49.

[8] 肖正康. 水电站压力钢管破坏影响因素与改进措施[J]. 科技与企业,2014(13):333. (XIAO Zhengkang. Analysis on influence factors and improvement measure on destruction of hydraulic steel penstocks [J]. Science Technology and Enterprise, 2014(13): 333. (in Chinese))

[9] 韦山红. 水电站压力钢管破坏影响因素与改进措施[J]. 红水河,2013(4):64-66. (WEI Shanhong. Analysis on influence factors and improvement measure on destruction of hydraulic steel penstocks [J]. Hongshui River, 2013(4): 64-66. (in Chinese))

[10] 梅燕,王兆成. 水电站压力钢管用 600 MPa 级 CF 钢产生焊接裂纹的探讨[J]. 水力发电,2008,34(3):76-78. (MEI Yan, WANG Zhaocheng. Research on welding crack of 600 MPa crack free steel of penstock [J]. Water Power, 2008, 34(3): 76-78. (in Chinese))

[11] HU Jianyong, ZHANG Jian, YU Xiaodong. Study on hydraulic simulation model of pipe break [C]//World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability. New York: ASCE, 2011:4488-4497.

[12] 胡建永,张健,陈胜. 大型多支供水工程的爆管水力过渡过程分析[J]. 水电能源科学,2014,32(1):73-76. (HU Jianyong, ZHANG Jian, CHEN Sheng. Hydraulic transient process analysis of pipe burst in large-scale and multi-branch water supply project [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(1): 73-76. (in Chinese))

[13] 赵丹丹. 基于 SCADA 系统的爆管监测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[14] 王捷,贾辉,张宏伟,等. 供水管线渗漏水力分析[J]. 水利学报,2008,39(8):1001-1004. (WANG Jie, JIA Hui, ZHANG Hongwei, et al. Hydraulic analysis on leakage of water supply pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8): 1001-1004. (in Chinese))

[15] 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, ZHU Fei, 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))

(收稿日期:2014-09-25 编辑:熊水斌)

