

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.012

设置并联调压室的长引水式水电站稳定性分析

周建旭,邵卫红,黄笑同,朱 飞

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为保证水电站机组的稳定运行和供电质量,对设置并联调压室的长引水式水电站建立了准确的数学模型,以全面模拟水力-机械系统的动态特性,开展系统的小波动稳定性分析;基于压力管道内水体刚性模型和弹性模型,分别建立了描述水力-机械系统动态特性的分析模型,综合频域和时域分析,研究了不同的输水系统布置形式和压力管道内水体采用不同阶数弹性模型对系统稳定性分析的影响。算例分析表明,考虑到传统刚性模型的应用局限性,长引水式水电站压力管道内水体应采用三阶或三阶以上的弹性模型,以全面揭示系统的振动特性和稳定性能。

关键词: 引水式水电站;并联调压室;稳定性;小波动;弹性模型

中图分类号: TV732.5;TV131.3⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)02-0159-06

Stability analysis of long-distance water diversion-type hydropower station with parallel surge chambers

ZHOU Jianxu, SHAO Weihong, HUANG Xiaotong, ZHU Fei

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

Abstract: To guarantee stable operation and power quality in the turbine units of a hydropower station, an exact mathematical model was built for a long-distance water diversion-type hydropower station with parallel surge chambers. The dynamic characteristics of the hydro-mechanical system were comprehensively simulated, and stability analysis of small fluctuations in the system was conducted. Based on the rigid model and elastic model for the pipe flow, analysis models were established to describe the dynamic characteristics of the hydro-mechanical system. Combined with numerical analysis of both frequency and the time domain, the effects of different layouts of the water diversion system and elastic models with different orders for the pipe flow on the system's stability analysis were investigated. An example shows that, instead of the commonly used rigid model, which has application limitations, a three-order or higher-order elastic model should be used for the pipe flow at the long-distance water diversion-type hydropower station to fully demonstrate the system's vibration characteristics and stability performance.

Key words: water diversion-type hydropower station; parallel surge chambers; stability; small fluctuation; elastic model

在水电站运行和控制中,除了调节保证计算和水力干扰稳定性分析以外,小波动过渡过程^[1]计算分析亦是水电站瞬变流分析的重要内容。小波动稳定性分析涉及水电站水力-机械系统的动态特性、相关数学模型的建立以及系统的稳定性和调节品质评估等各个方面,因此应建立合理的水电站水力-机械系统的动态分析模型,以进一步开展系统的稳定性分析。

基于水电站水力-机械系统的建模,国内外诸多学者对水电站小波动稳定性分析和运行控制,以及系统水力振动特性开展了较为广泛而深入的研究^[2-7]。对于设置并联调压室的长输水系统水电站而言,水库、引水隧洞、引水支洞和两并联调压室形成具有 3 个自由水面的振荡系统,其动态特性不同于单一的水库-引水

收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(90610027,51079051)

作者简介: 周建旭(1971—),男,浙江义乌人,教授,博士,主要从事水电站及泵站水力学研究。E-mail: jianxuzhou@163.com

道-调压室系统;同时,长引水道或压力管道内水流的高阶振动频率可能与系统常见扰动源的扰动频率接近而引起共振,因此,水力-机械系统的建模,以及系统的运行稳定性和调节品质分析更具特殊性和复杂性,在进行系统稳定性分析时,考虑传统的水体刚性模型和弹性模型在应用上的局限性,压力管道内水体应采用合理阶数弹性模型描述其动态特性。本文采用基于变分理论的压力管道内水体的弹性模型,建立了设置并联调压室的长输水系统水电站的稳定性分析模型,开展系统的小波动稳定性分析;同时,结合单一引水调压室布置方案以及压力管道内水体刚性模型作比较分析,阐明了此类输水系统在小扰动下的动态特性及其稳定性,验证和指出了长输水系统水电站中压力管道内水体采用合理阶数弹性模型的必要性,以准确揭示水力系统的动态特性及其对系统稳定性的影响。

1 压力管道内水体的分析模型

1.1 刚性模型

在水电站水力-机械系统稳定性分析中,压力管道内水体通常采用刚性模型来描述。图1所示为典型的单一特性管道,不考虑其内水体及管壁弹性,描述压力管道内水流动态特性的刚性模型为

$$\frac{l}{gA} \frac{d\Delta Q}{dt} = \Delta H_1 - \Delta H_2 - h_{12} \tag{1}$$

式中: l ——管道长度; g ——重力加速度; A ——管道断面面积; ΔQ ——流量增量; ΔH_1 ——进口测压管水头增量; ΔH_2 ——出口测压管水头增量; h_{12} ——总水头损失。

1.2 基于变分理论的弹性模型

对于长引水式电站,需采用弹性模型来描述压力管道内水体的动态特性。陈舟等^[2]指出,水力系统应采用弹性模型来模拟其对电力系统低频振荡模式的影响;jr Souza 等^[3]引进压力管道等效电路讨论了压力管道内水体的数学模型;赵桂连等^[4]建立了水机电系统联合非线性数值仿真模型,分析了负载阶跃扰动下水力-机械系统的调节品质;梁宏柱等^[5]探讨了一种基于精确模型的以“ e 指数”描述的压力管道内水体弹性模型;汤维华等^[6]导出了水力系统详细模型下的小波动稳定分析的多机系统线性化模型;Taniguchi 等^[7]基于保留零点和极点的压力管道内水体的弹性模型,讨论了水力系统模型对低频振荡阻尼分析的影响;周建旭等^[8]从振型分析方法出发,应用变分原理,推导出了易于描述压力管道内水体高阶振荡特性的弹性模型。引入管道出口流量增量 ΔQ_2 和振荡流量 q_{1k} ,图1所示压力管道内水体采用 n 阶弹性模型,可表示为

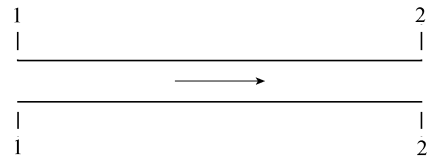


图1 单一特性管道

Fig. 1 Single pipeline

$$\frac{dT_{1k}}{dt} = q_{1k} \tag{2}$$

$$\frac{dq_{1k}}{dt} = -\frac{fQ_0}{DA}q_{1k} - \frac{(k\pi a)^2}{l^2}T_{1k} + \frac{2gA}{l}[\Delta H_1 - \Delta H_2(-1)^k] \tag{3}$$

$$\frac{d\Delta Q_2}{dt} = -\frac{fQ_0}{DA}\Delta Q_2 - \sum_{j=1}^n \frac{(j\pi a)^2}{l^2}(-1)^jT_{1j} + \frac{gA}{l}[1 + 2\sum_{j=1}^n (-1)^j]\Delta H_1 - \frac{gA}{l}(2n+1)\Delta H_2 \tag{4}$$

式中: q_{1k} 、 T_{1k} ($k=1, 2, \dots, n$) —— k 阶振荡流量和中间变量; f ——管道摩阻; Q_0 ——管道初始流量; D ——管道直径; a ——水锤波速。

该数学模型既适用于频域分析,又能进行时域分析,并且可依据管道的实际长度选择合理的模型阶数,广泛应用于长引水式水电站和长距离有压供水系统的振动特性和稳定性分析^[9-10]。Zhou 等^[11]基于变分理论的压力管道内水体的弹性模型,论证分析了长输水系统水电站中压力管道内水体采用合理阶数弹性模型的必要性。

2 基于弹性模型的系统稳定性分析

图2所示为一设置并联调压室的长引水式水电站,引水系统采用一洞两机的供水方式,在每根支管上游侧不同位置分别布置一座引水调压室,为充分考虑压力管道内水体的动态特性,需建立较准确的系统稳定性

分析模型,以开展全面的系统稳定性分析。

2.1 状态方程

图 2 中,定义 Q_{10} 、 Q_{20} 、 Q_{30} 分别为引水主洞 1、引水支管 2 和 3 的初始流量, q_1 、 q_2 、 q_3 分别为引水主洞 1、引水支管 2 和 3 的流量变化相对值, h_{10} 、 h_{20} 、 h_{30} 分别为初始状态下引水主洞 1、引水支管 2 和 3 的水头损失, Z_{s10} 、 Z_{s20} 和 z_{s1} 、 z_{s2} 分别为两个调压室的初始水位和水位变化相对值, l_i 和 A_i ($i=1,2,\cdots,5$) 分别为各管段长度和断面面积。基于式(2)~(4),引水主洞内水体考虑采用三阶弹性模型,因管道 1 进口端为水库,水位不变,则可得

$$\frac{dT_{1k}}{dt} = q_{1k} \tag{5}$$

$$\frac{l_1}{gA_1} \frac{dq_{1k}}{dt} = -Rl_1q_{1k} - \frac{l_1}{gA_1} \frac{(k\pi a)^2}{l_1^2} T_{1k} - 2\Delta H_B(-1)^k \tag{6}$$

$$\frac{l_1Q_{10}}{7gA_1} \frac{dq_1}{dt} = -\frac{2}{7}h_{10}q_1 - \frac{l_1}{7gA_1} \sum_{j=1}^3 \frac{(j\pi a)^2}{l_1^2} (-1)^j T_{1j} - \Delta H_B \tag{7}$$

其中

$$R = \frac{fQ_{10}}{gD_1A_1^2}$$

式中: R ——阻力系数; D_1 ——引水主洞 1 的直径; ΔH_B ——引水分岔点 B 的测压管水头增量。

引水支管 2 和 3 均采用刚性模型来描述水体的动态特性,相应的状态方程为

$$\frac{l_2Q_{20}}{gA_2} \frac{dq_2}{dt} = \Delta H_B - Z_{s10}z_{s1} - 2h_{20}q_2 \qquad \frac{l_3Q_{30}}{gA_3} \frac{dq_3}{dt} = \Delta H_B - Z_{s20}z_{s2} - 2h_{30}q_3 \tag{8}$$

基于式(5)~(8),消去中间量 ΔH_B ,得到关于状态变量 q_1 、 q_2 、 q_3 以及 q_{1k} 、 T_{1k} 的状态方程,联立两座引水调压室的水流连续性方程、压力钢管 4 和 5 内水体的动力方程,以及描述机组转速和调速器动态特性的状态方程^[12],即可得出用于系统稳定性分析的整体状态方程;类似地,也可得到引水主洞内水体采用刚性模型或压力钢管支管 4 和 5 采用弹性模型对应的系统稳定性分析模型。

2.2 稳定性分析

建立的水电站水力-机械系统稳定性分析模型表现为一系列常微分方程,形成用矩阵形式描述的状态方程组^[12-13],采用特征分析法可计算得到其系数矩阵的所有特征值,可定性判断系统的稳定性;同时,采用相关因子法可明确与各特征值对应的振荡模式强相关的状态变量;若给定负荷相对小扰动 x ,即可求得各状态变量的动态过程,并可开展进一步的调节品质分析。

3 算例分析

3.1 系统参数

某一上游设置并联调压室的长引水式水电站,系统布置如图 2 所示,管道 1~5 的长度依次为 1 335.64 m、276.30 m、241.17 m、2 079.35 m 和 2 097.27 m,各管道断面当量面积依次为 28.279 m²、15.588 m²、15.646 m²、12.885 m² 和 12.963 m²;水轮机型号 HLF143AO-LJ-240,转速 300 r/min,转动惯量为 10 130 t·m²;调压室面积 30.175 4 m²;调速器缓冲时间常数为 6.5 s,暂态转差系数为 0.5,永态转差系数为 0.04。

通常机组运行水头越低,水力-机械系统稳定性越差,故拟定工况:水库水位 1 721.0 m,尾水位 1 307.7 m,两机组最小水头满出力运行,同时发生-10% 负荷阶跃扰动。结合该工况,开展系统的小波动稳定性分析。

3.2 输水系统布置方案的比较分析

另设置一个该水电站输水系统的比较方案,即在引水分岔点位置设置单一引水调压室,其有效面积近似为并联调压室方案中两个调压室面积之和^[14],基于压力管道内水体的刚性模型,建立该水力-机械系统的稳定性分析模型。针对两种方案,考虑引水分岔点的局部水头损失,将其综合反映在引水主洞的水头损失中,开展系统的小波动稳定性比较分析。给定工况下设置并联调压室布置方案对应系数矩阵的全部特征值为

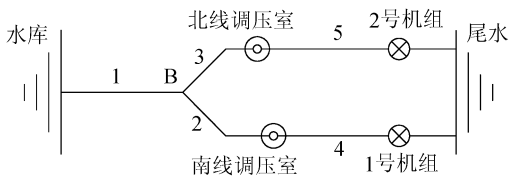


图 2 设置并联调压室的长引水式水电站布置示意图
Fig. 2 Layout of long-distance water diversion-type hydropower station with parallel surge chambers

$-0.003\,65\pm i0.053$ 、 $-0.003\,07\pm i0.139$ 、 $-0.079\,20\pm i0.383$ 、 $-0.079\,90\pm i0.384$ 、 $-0.148\,00$ 和 $-0.148\,00$, 设置单一调压室布置方案的全部特征值为 $-0.003\,81\pm i0.058$ 、 $-0.072\,60\pm i0.381$ 、 $-0.076\,50\pm i0.384$ 、 $-0.134\,00$ 和 $-0.134\,00$ 。当两机同时发生 -10% 负荷阶跃扰动时, 得到两种布置方案对应的调压室水位变化相对量和 1 号机组转速变化相对量的动态过程如图 3 所示(图中 z 为调压室水位变化相对量, φ 为机组转速变化相对量)。

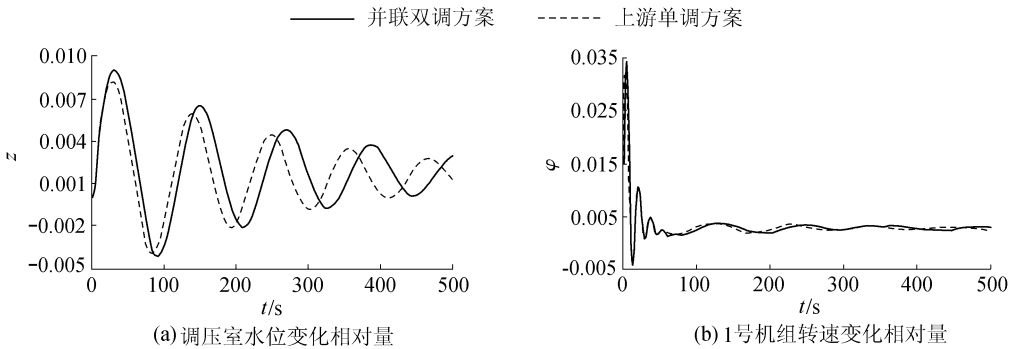


图3 小波动过渡过程主要参数的动态曲线

Fig. 3 Dynamic curves of main parameters in small fluctuation transition process

对 2 种方案分析表明:2 种方案对应系统所有特征值的实部均为负值,小波动过渡过程均是稳定的,控制特征值接近,且机组转速动态过程基本一致,均衰减较快,其中设置并联调压室方案对应的控制特征值的实部略小;采用并联调压室方案后,控制特征值 $-0.003\,65\pm i0.053$ 和 $-0.003\,07\pm i0.139$ 分别与各支路调压室水位以及上游侧各管道的流量强相关,两者存在较大的偏差,两调压室之间的水力联系不易形成两个相对独立的振荡系统,亦不易发生两调压室或两管道间的水力共振。

3.3 引水主洞内水体高阶振动特性的影响分析

周建旭等^[8]建议应结合压力管道实际长度,采用合理阶数的弹性模型来描述其内水体的动态特性,本算例中水电站引水主洞和压力钢管支管长度均超过 1 000 m,考虑引入三阶弹性模型来描述引水主洞内水体的动态特性,而压力钢管支管仍采用刚性模型描述,研究引水主洞内水体高阶振动特性对系统稳定性的影响;类似地,也可开展压力钢管支管内水体高阶振动特性对系统稳定性的影响研究。基于本算例拟定工况,表 1 列出了引水主洞内水体采用刚性模型和一、二、三阶弹性模型时系统对应系数矩阵的所有复特征值,并结合相关因子法分析给出了各复特征值与各状态变量之间的相关关系及对应的振荡模式。

表 1 引水主洞内水体采用不同阶数模型时系统特征值分析

特征值		特征值 $\sigma_k \pm i\omega_k$				相关因子分析		
编号	刚性模型	一阶弹性模型	二阶弹性模型	三阶弹性模型	强相关状态变量	次相关状态变量	振荡模式	
1	$-0.003\,65\pm i0.053$	$-0.003\,65\pm i0.053$	$-0.003\,65\pm i0.053$	$-0.003\,65\pm i0.053$	q_2, z_{s1}	q_3, z_{s2}	水力振荡(调压室)	
2	$-0.003\,07\pm i0.139$	$-0.003\,07\pm i0.139$	$-0.003\,07\pm i0.139$	$-0.003\,07\pm i0.139$	q_3, z_{s2}	q_2, z_{s1}	水力振荡(调压室)	
3	$-0.079\,20\pm i0.383$	$-0.079\,20\pm i0.383$	$-0.079\,20\pm i0.383$	$-0.079\,20\pm i0.383$	q_{12}, μ_2	φ_2	机械振荡	
4	$-0.079\,90\pm i0.384$	$-0.079\,90\pm i0.384$	$-0.079\,90\pm i0.384$	$-0.079\,90\pm i0.384$	q_{11}, μ_1	φ_1	机械振荡	
5		$-0.003\,70\pm i2.070$	$-0.003\,70\pm i2.050$	$-0.003\,69\pm i2.040$	T_{11}, q_{11}		水力振荡(引水道)	
6			$-0.003\,72\pm i4.280$	$-0.003\,71\pm i4.230$	T_{12}, q_{12}		水力振荡(引水道)	
7				$-0.003\,73\pm i6.570$	T_{13}, q_{13}		水力振荡(引水道)	

注: q_{11} 、 q_{12} 和 μ_1 、 μ_2 分别为两机组的流量变化相对量和开度变化相对量。

由表 1 可见:

a. 引水主洞水体采用刚性或低阶弹性模型可能会遗漏系统重要的高阶频率信息,而采用合理的高阶弹性模型能全面地反映出压力管道内水体的振动特性,以准确地分析系统可能的水力振动特性及稳定性。对应引水主洞内水体采用三阶弹性模型,系统共有 7 个典型的振荡频率,包括与两座调压室水位强相关的 2 个特征频率,表征调压室水位波动的频率特性;与机组动态参数强相关的 2 个特征频率,主要表征机组开度和转速的动态特性;与引水主洞内水体的一、二、三阶振荡流量强相关的 3 个特征频率,均与引水主洞长度成反比,与引水主洞内水体水锤波速成正比,分别表征引水主洞内水体的一、二、三阶自由振动的频率特性。

b. 引水主洞内水体采用刚性或一、二、三阶弹性模型,系统小波动稳定性分析的控制特征值不变,仅增加了与各阶振荡流量强相关的复特征值;因各复特征值实部,即衰减因子与系统的水头损失密切相关,因此,若考虑水头损失系数的变化或者对应不同的输水系统,增加的复特征值有可能会成为系统的控制特征值,即考虑压力管道内水体弹性模型有利于准确判断系统的稳定性和调节品质。

c. 利用刚性模型进行稳定性分析得到的系统主导频率均小于0.061 Hz,而依据系统中常见的扰动源-尾水管涡带频率的分析公式^[15],计算得扰动频率范围为0.835~2.5 Hz,两者相差较大,若考虑引水主洞内水体的高阶动态特性,基于三阶弹性模型进行系统稳定性分析,则涵盖的系统主导频率范围拓宽到1.05 Hz(对应角频率为6.57 rad/s),输水道内水体较高阶振荡频率有可能与尾水管涡带扰动频率接近或一致,易引起系统的水力共振,即引入压力管道内水体的高阶弹性模型可以更加准确地描述系统的振动特性。

进一步,引水主洞内水体采用三阶弹性模型,当两机同时发生-10%负荷阶跃扰动时,可得图4所示的各阶振荡流量 q_{11} 、 q_{12} 和 q_{13} 的动态过程线。

由图4可见:引水分岔点处各阶振荡流量均是衰减的,振荡频率与调压室水位波动频率接近;振荡流量阶次越高,振荡幅值越小,且随着阶数的递增,流量振荡的相位呈交替变化;在各阶振荡流量动态曲线上,均叠加衰减的高频振荡,频率均对应于相应复特征值的虚部,即特征角频率,以第一阶振荡流量为例,通过局部放大可得高频振荡频率为0.326 Hz,对应特征值为 $-0.003\ 69 \pm i2.040$ (频率为0.325 Hz),两者基本一致。

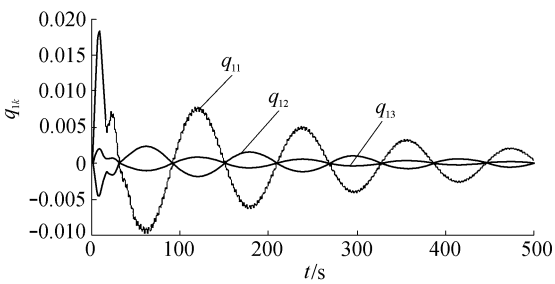


图4 引水分岔点处各阶振荡流量的动态曲线

Fig. 4 Dynamic curves of oscillation flow with different orders at diversion bifurcation

4 结 论

- a. 设置并联调压室的长引水式水电站水力-机械系统小波动过渡过程能够实现优良的调节品质,且不易发生两调压室之间的水力共振。
- b. 长引水隧洞内水体采用刚性模型或一、二、三阶弹性模型,通常水力-机械系统小波动稳定性分析的控制特征值不变,仅增加与各阶振荡流量强相关的复特征值;若考虑水头损失系数的变化或者针对不同的输水系统,增加的复特征值可能会成为系统稳定性分析的控制特征值。
- c. 长引水隧洞内水体采用三阶弹性模型,稳定性分析得到的各阶振荡流量均是衰减的,振荡频率与调压室水位的波动频率接近;随着振荡阶数的递增,流量的振荡幅值减小,且相位呈交替变化;同时,在各阶振荡流量动态曲线上,均叠加有衰减的高频振荡,振荡频率与相应复特征值虚部对应的特征频率一致。
- d. 在小波动稳定性分析中,结合有压管道的实际长度采用三阶或三阶以上的高阶弹性模型能更全面地反映出管道内水体的振动特性,涵盖的系统主导频率范围更宽,得到的水力系统较高阶振荡频率有可能与尾水管涡带等扰动源的扰动频率接近或一致,易引起系统的水力共振。

参考文献:

[1] 焦云乔,江春波,孔庆蓉,等.长引水隧洞水电站小波动过渡过程影响因素研究[J].水力发电学报,2009,28(3):157-163. (JIAO Yunqiao,JIANG Chunbo,KONG Qingrong,et al. Study on stability of small oscillation transient process of hydropower station with long-distance diversion tunnel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(3):157-163. (in Chinese))

[2] 陈舟,刁勤华,陈寿孙,等.水力系统模型对电力系统低频振荡分析的影响[J].清华大学学报:自然科学版,1996,36(7):67-72. (CHEN Zhou,DIAO Qinhua,CHEN Shousun,et al. Study on the effect of hydraulic system models on power system dynamic stability analysis[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1996,36(7):67-72. (in Chinese))

[3] jr SOUZA O H,BARBIERI N. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1269-1272.

[4] 赵桂连,杨建东,杨安林.电气过渡过程对转速调节品质的影响[J].水力发电学报,2007,26(1):135-138. (ZHAO Guilian,YANG Jiandong,YANG Anlin. The influence of electric transient process on speed regulation quality[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(1):135-138. (in Chinese))

[5] 梁宏柱,叶鲁卿,孟安波.一种基于精确模型的水电站弹性水击计算新方法[J].大电机技术,2004(5):49-52. (LIANG

Hongzhu, YE Luqing, MENG Anbo. A new method for calculation of water hammer based on precise model[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004(5):49-52. (in Chinese))

[6] 汤维华,张春丽,秦勇,等. 水力系统详细模型下的小干扰稳定分析线性化模型[J]. 水力发电, 2007, 33(3):80-83. (TANG Weihua, ZHANG Chunli, QIN Yong, et al. Linear model of dynamic stability analysis under the detailed hydraulic system model [J]. Water Power, 2007, 33(3):80-83. (in Chinese))

[7] TANIGUCHI H, NAGAO T, HIGASA H. Development of a pumped-storage power station model for power system stability study [J]. Electrical Engineering in Japan, 1992, 112(3):50-62.

[8] 周建旭,索丽生,朱永忠. 基于变分理论的压力管道内水体弹性模型研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5):109-113. (ZHOU Jianxu, SUO Lisheng, ZHU Yongzhong. Study on elastic model of water flow in pressurized pipeline based on variation theory[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5):109-113. (in Chinese))

[9] 贾俊杰,周建旭,韩玉文. 长距离供水系统水力振动特性和减振措施研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3):89-94. (JIA Junjie, ZHOU Jianxu, HAN Yuwen. Reviews on hydraulic vibration characteristics and vibration reduction measures of long-distance water supply system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3):89-94. (in Chinese))

[10] 王源,周建旭. 水力-机械系统特性分析中管道水体弹性模型研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1):91-94. (WANG Yuan, ZHOU Jianxu. A review of elastic models of pipe flow in characteristic analysis of hydraulic-mechanical system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(1):91-94. (in Chinese))

[11] ZHOU Jianxu, CAI Fulin, WANG Yuan. New elastic model of pipe flow for stability analysis of the governor-turbine-hydraulic system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(10):1238-1247.

[12] 俞晓东,李高会,卢伟华. 基于两种数学模型的水力-机械系统小波动稳定分析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5):172-175. (YU Xiaodong, LI Gaohui, LU Weihua. Stability analysis on small fluctuation of hydro-mechanical system based on two mathematical models[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(5):172-175. (in Chinese))

[13] 郑源,刘德有,索丽生. 水电站引水系统取消尾水调压室过渡过程计算研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2000, 28(2):96-100. (ZHENG Yuan, LIU Deyou, SUO Lisheng. Computation research of the transition process of the diversion system at hydropower station[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2000, 28(2):96-100. (in Chinese))

[14] 曾艳梅,黄素满,喻忻. Rudbar 水电站水力过渡过程分析研究[C]//中国水力发电工程学会水力机械专业委员会, 中国电机工程学会水电设备专业委员会, 中国动力工程学会水轮机专业委员会. 水电设备的研究与实践, 第十七次中国水电设备学术讨论会论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2009:209-215.

[15] 索丽生,周建旭,刘德有. 水电站有压输水系统的水力共振[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(4):12-14. (SUO Lisheng, ZHOU Jianxu, LIU Deyou. Hydraulic resonance in pressurized piping system of hydropower plants[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(4):12-14. (in Chinese))



· 简讯 ·

河海大学获 4 项 2013 年江苏省科技进步奖

2013 年江苏省科技进步奖 2014 年 1 月 24 日正式公布,共有 199 个项目获奖,其中一等奖 20 项,二等奖 58 项,三等奖 121 项。河海大学的"复杂河网水力调控关键技术及实践"、"特殊地基土的力学特性与高速公路控制变形成套技术"获一等奖,"多场耦合多尺度岩石力学研究"、"太湖湖泛成因及防控关键技术与工程示范"获二等奖。

(本刊编辑部供稿)