

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.02.023

马马崖一级水电站水轮机调节系统 大波动过渡过程分析

莫春霞^{1,2}, 晋良海¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 马马崖一级水电站发电引水系统中的流量瞬间变化较大, 致使水轮机调节系统产生大波动过程, 从而引起机组转速升高、蜗壳压力升高、转轮出口压力降低, 对于机组及过水建筑物影响很大。根据施工图纸、机组及调速系统资料, 对水轮机调节系统大波动过渡过程进行复核计算, 分析蜗壳最大压力升高值、机组转速最大升高值和转轮出口最低压力值的发生工况及其影响, 为该水电站的启动调试和后期运行提供了依据。

关键词: 水电站; 水轮机; 调节系统; 大波动; 过渡过程

中图分类号: TV512

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)02-0110-06

Analysis of Large Fluctuation Transition Process in Hydroturbine Regulating System of Mamaya I Hydropower Station

MO Chun-xia^{1,2}, JIN Liang-hai¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Guiyang Engineering Corporation Limited of Power China, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: The installed capacity of Mamaya I hydropower station is $3 \times 180 \text{ MW} + 1 \times 18 \text{ MW}$. Because the transient flow of water diversion and power generation system changes quickly, large fluctuations occur in the hydroturbine regulating system, resulting in elevated rotating speed and volute pressure but decreased runner outlet pressure. All the changes affect the hydroturbine system and the station building drastically. According to the final construction drawings, data of the hydroturbine system and speed regulating system, the process of large fluctuations was calculated and double-checked. Meanwhile the increasing values of the maximum volute pressure, rotating speed and minimum runner outlet pressure were analyzed to study the conditions when these values occurred. This study will provide a theoretical basis for the start-up and subsequent operation.

Keywords: hydropower station; hydroturbine; regulating system; large fluctuations; transition process

马马崖一级水电站装机 $3 \times 180 \text{ MW} + 1 \times 18 \text{ MW}$, 运行方式为: 当 3 台 180 MW 大机组因调峰或检修等缘故全部停止发电时, 18 MW 的生态小机组按 $29.78 \text{ m}^3/\text{s}$ 的引用流量发电; 当 3 台 180 MW 大机组均按满负荷发电尚有弃水时, 18 MW 的生态小机组可与大机组同时发电以减少弃水, 充分利用水

资源。其他情况下根据来水流量及负荷需求合理安排 3 台 180 MW 大机组的开机台数和机组出力。

该水电站建成后在系统中承担调峰、调频及事故备用; 小机组承担下泄生态流量发电作用。水轮机调节系统大波动过程是机组突增或突减负荷和甩负荷的过程, 此时伴随着整个发电引水系统水力由

收稿日期: 2014-10-01

修稿日期: 2014-12-30

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB690)

作者简介: 莫春霞(1977—), 女, 贵州都匀人, 高级工程师, 从事水电站水力机械设计工作。E-mail: mchxy@qq.com

通讯作者: 晋良海(1973—), 男, 四川简阳人, 博士, 副教授, 全国注册监理工程师, 主要从事水利水电建设项目运筹和施工作业安全工效研究。E-mail: jinlianghai@tom.com

“稳定-过渡-稳定”的瞬变过程^[1-2]。由于发电引水系统中的流量瞬间变化,引起机组转速升高、蜗壳压力升高、转轮出口压力降低,整个瞬变过程经过一段时间后逐步衰减为相对稳定状态^[3-5]。对于机组和过水建筑物而言,大波动过渡过程计算尤其是甩负荷计算(即调节保证计算)尤为重要^[4-6]。

1 计算目的与基本参数

1.1 计算目的

过渡过程是电站引水系统中普遍存在的水力现象,正确分析过渡过程状态及其水力特性,对引水系统和机组的设计与运行都具有重要意义^[7-10]。

计算目的:根据施工图纸、机组及调速系统资料,进行过渡过程复核计算,为启动调试和后期运行提供依据。

(1) 复核大波动工况下的各项参数极值,如水轮机甩负荷或增负荷等工况下,蜗壳最大压力、机组最大转速、尾水管真空度及引水系统特定点最低压力等。

(2) 优化水轮机导叶关闭规律。

(3) 校验电站调节系统能否满足大、小波动稳定要求。

1.2 水库特征参数

校核洪水位:590.29 m;设计洪水位:585.60 m;正常蓄水位:585.00 m;死水位:580.00 m;水库总库容:1.695 亿 m^3 ;调节库容:0.307 亿 m^3 ;调节特性:日调节。

1.3 下游尾水位

校核洪水尾水位($P = 0.2\%$, $Q = 10\,220\ \text{m}^3/\text{s}$): 538.99 m。

设计洪水尾水位($P = 1\%$, $Q = 8\,498\ \text{m}^3/\text{s}$): 535.04 m。

三台大机+生态机组发电额定出力对应尾水位($Q = 910.61\ \text{m}^3/\text{s}$):511.45 m。

一台大机+生态机组发电额定出力对应尾水位($Q = 323.39\ \text{m}^3/\text{s}$):508.12 m。

三台大机发最大出力(105% N_r) + 生态机组对应尾水位($Q = 986.78\ \text{m}^3/\text{s}$):511.80 m。

一台大机发最大出力(105% N_r) + 生态机组对应尾水位($Q = 348.78\ \text{m}^3/\text{s}$):508.30 m。

一台大机额定水头下发额定出力对应尾水位($Q = 293.61\ \text{m}^3/\text{s}$):507.90 m。

一台大机额定水头下发最大出力(105% N_r)对应尾水位($Q = 319.00\ \text{m}^3/\text{s}$):508.09 m。

一台生态机组额定水头下发额定出力对应尾水位($Q = 29.78\ \text{m}^3/\text{s}$):504.62 m。

1.4 水头参数

最大净水头:79.2 m;加权平均净水头:72.8 m;额定水头:69 m;最小净水头:57.5 m。

1.5 机组参数

(1) 大机组参数

转轮直径 D_1 :5.5 m;水轮机额定出力:183.67 MW;水轮机最大出力:192.854 MW;额定转速:125 r/min;额定流量:293.61 m^3/s ;额定水头下发最大出力时流量:319.00 m^3/s ;发电机 GD^2 : $4.6 \times 10^7\ \text{kN}\cdot\text{m}^2$;安装高程:500.90 m。

(2) 小机组参数

转轮直径 D_1 :1.9 m;水轮机额定出力:18.65 MW;额定转速:333.3 r/min;额定流量:29.78 m^3/s ;发电机 GD^2 : $4.0 \times 10^5\ \text{kN}\cdot\text{m}^2$;安装高程:501.80 m。

2 计算准则与工况

2.1 计算准则

(1) 机组甩负荷的最大转速升高率。当机组容量占电力系统总容量的比重较大,或担负调频任务时,宜小于50%;当机组容量占电力系统总容量的比重不大或不担负调频任务时,宜小于60%。根据本电站大机组以发电为主,在系统中承担调峰、调频和事故备用等作用,确定所有1#~3#机组最大转速上升率宜小于50%。生态机组容量较小,不承担调频调峰任务,确定最大转速上升率宜小于60%。

(2) 机组甩负荷的蜗壳最大压力升高率。额定水头40 m~100 m时,宜为50%~30%;额定水头100 m~300 m时,宜为30%~25%。最大压力升高率保证值应按计算值并留有适当余量来确定。根据本电站额定水头为69 m,最大水头为79.2 m,结合可研阶段调节保证计算结果、机组招标参数及水工设计强度,确定本阶段大机组和生态机组的蜗壳最大压强水头值 $H_{\max} \leq 110\ \text{m}$ 。

(3) 当机组突增负荷或突减负荷时,压力输水系统全线各断面最高点处的最小压力不应低于0.02 MPa,不得出现负压及脱流现象。甩负荷时,尾水管进口断面的最大真空保证值不应大于0.08 MPa,经海拔修正后,尾水管最低压力值不低于-7.5 m。

(4) 水轮机过水系统的水流惯性时间常数 T_w 。对于比例、积分、微分(PID)型调速器不大于4 s, T_w 与机组惯性时间常数 T_a 的比值不大于0.4, T_a 值不小于4 s。

(5) 调速器应保证机组在各种工况和运行方式下的稳定要求。同时机组甩负荷后动态品质应达到:① 甩 100% 额定负荷后,在转速变化过程中,超过稳态转速 3% 以上的波峰不超过两次;② 机组甩 100% 额定负荷后,从接力器第一次向开启方向移动起,到机组转速摆动值不超过 $\pm 0.5\%$ 为止所经历的时间不应大于 40 s。

2.2 计算工况

计算工况必须选择合理,即必须符合电站实际运行情况,同时为计算各个极值选定的工况还必须准确,即不能拿一个次要工况作为最不利工况。对于最不利的组合工况还应该考虑其发生的概率,为达到不同计算目的,分别选择不同工况。

本电站 1# 机水力过渡过程计算分水轮机额定水头下发额定出力和发最大出力两种情况。

(1) 水轮机额定水头下发额定出力的情况下,选定的控制计算工况如下:

① 蜗壳最大压力上升:校核洪水位下,四台机运行,1#、4# 机同时甩全负荷,紧急停机。

② 机组转速上升:1#、4# 机运行时,1#、4# 机额定水头下甩额定负荷至空载运行。

③ 转轮出口最低压力:上游死水位下,1# 机运行,甩全负荷,紧急停机。

(2) 水轮机额定水头下发最大出力的情况下,选定的控制计算工况如下:

① 校核洪水位下,四台机运行,1# ~ 3# 机超发 5%,1#、4# 机同时甩全负荷,紧急停机。

② 机组转速上升:四台机运行,1# ~ 3# 机额定水头下超发 5% 时,1#、4# 机额定水头下甩全负荷至空载运行。

③ 转轮出口最低压力:1#、4# 机运行时,1# 额定水头下超发 5%,1# 机额定水头下甩全负荷,紧急停机。

(3) 4# 机组(生态机组)水力过渡过程计算选定的控制计算工况如下:

① 蜗壳最大压力上升:校核洪水位下,四台机运行,1# ~ 3# 机超发 5%,1#、4# 机同时甩全负荷,紧急停机。

② 机组转速上升:四台机运行,1# ~ 3# 机额定水头下超发 5% 时,1#、4# 机额定水头下甩全负荷至空载运行。

③ 转轮出口最低压力:1#、4# 机运行时,1# 额定水头下超发 5%,4# 机额定水头下甩额定负荷,紧急停机。

3 大波动过渡过程计算分析

(1) 优化导叶关闭规律

限制水击压力升高与限制机组转速升高的要求是互相制约的,矛盾的焦点是导叶关闭时间,故优化导叶关闭规律就是寻找能使两方面要求同时满足的关闭时间^[11-13]。根据确定的本电站大波动过渡过程技术要求,对不同导叶关闭规律进行试算^[14]。

根据优化计算确定大机组导叶采用直线关闭规律,总关闭时间 8.5 s(定义额定水头下发最大出力对应的开度为 100%,此时模型导叶开度为 40° ,对应的真机导叶开度为 443.42 mm,相应的接力器行程为 631.30 mm)。导叶关闭规律如图 1 所示。

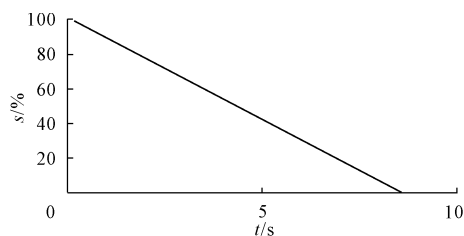


图 1 大机组导叶关闭规律

生态机组导叶亦采用直线关闭规律,总关闭时间 8.0 s(定义额定水头下发额定出力对应的开度为 100%,此时模型导叶开度为 33° ,对应的真机导叶开度为 120.56 mm,相应的接力器行程为 183.96 mm)。导叶关闭规律如图 2 所示。

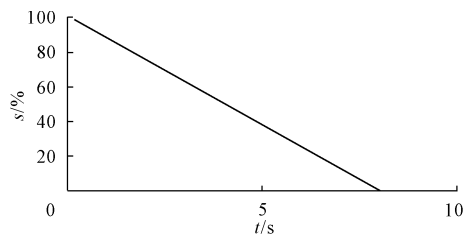


图 2 生态机组导叶关闭规律

(2) 蜗壳最大压力升高(注:下式中流速改用英文字母表示,下同)

$$H_{\max} = (1 + \xi)H_0 + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中: H_{\max} 为甩负荷过程中产生的最大压强水头(m); H_0 为甩负荷前蜗壳压强水头(m); $H_0 = Z_{\nabla\text{上游}} - Z_{\nabla\text{安}} - H_W - \frac{v^2}{2g}$, 其中, $Z_{\nabla\text{上游}}$ 为计算工况时上游水位; $Z_{\nabla\text{安}}$ 为水轮机安装水位; H_W 为总水头损失。

结果分析:

① 水轮机额定水头下发额定出力的情况下,1#

机蜗壳最大压力上升发生在校核洪水位下,四台机组运行,1[#]、4[#]机同时甩全负荷,紧急停机的工况,1[#]机蜗壳最大压强水头值为 106.4 m,对应的 $\xi = 24.7\%$ 。

② 水轮机额定水头下发最大出力的情况下,1[#]机蜗壳最大压力上升发生在校核洪水位下,四台机组运行,1[#]~3[#]超发 5%时,1[#]、4[#]机甩全负荷,紧急停机,1[#]机蜗壳最大压强水头值为 107.9 m,对应的 $\xi = 26.8\%$ 。

③ 4[#]机蜗壳最大压力上升发生在校核洪水位下,四台机运行,1[#]~3[#]机超发 5%,1[#]、4[#]机同时甩全负荷,紧急停机的工况,4[#]机蜗壳最大压强水头值为 106.5 m,对应 $\xi = 24.8\%$ 。

通常电站在 $GD^2: 4.6 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 直线关闭, $T_{\text{总}} = 8.5 \text{ s}$ 时最高运行水位为正常蓄水位,校核洪水位作为电站的强度设计依据^[15],一般机组不运行,故该电站蜗壳最大压强水头按 110 m 设计可以满足安全运行要求,具体见表 1。

表 1 马马崖一级水电站 1[#]机高水头大波动过渡过程计算结果

序号	计算工况	上游水位 下游水位 /m	Q /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	N /MW	水轮机 净水头 /m	机组 β /%	H_0 /m	ξ /%	H_{max} /m	尾水管 最小水压 /m
1	四台机组同时运行,1 [#] 机在额定水头下甩额定负荷,至空载运行。	582.94 511.45	293.61	183.67	69.0	41.4	78.73	26.9	100.6	-2.6
2	正常蓄水位,四台机同时运行,1 [#] 机甩额定负荷,紧急停机。	585.00 511.40	281.7	183.67	71.4	41.3	81.1	26.5	97.4	-2.3
3	校核洪水位,四台机运行,1 [#] 、4 [#] 机同时甩全负荷,紧急停机。	590.29 538.99	254.0	115.1	49.51	29.2	87.0	24.7	106.4	26.7
4	1 [#] 、4 [#] 机运行,在额定水头下甩额定负荷至空载运行。	580.00 508.12	293.61	183.67	69.0	43.8	75.4	29.0	99.1	-6.0
5	1 [#] 、4 [#] 机运行,在额定水头下甩额定负荷,紧急停机。	580.00 508.12	293.61	183.67	69.0	41.4	75.4	28.7	99.3	-6.1
6	四台机同时运行,1 [#] ~3 [#] 机组超发 5%,1 [#] 、4 [#] 机同时甩全负荷至空载运行。	586.04 511.45	298.2	192.85	72.1	42.5	81.8	29.0	105.1	-3.8
7	四台机同时运行,1 [#] ~3 [#] 机组超发 5%,1 [#] 、4 [#] 机同时甩全负荷,紧急停机。	586.04 511.45	298.2	192.85	72.1	42.2	81.8	29.1	105.3	-3.9
8	上游死水位,1 [#] 机运行,甩全负荷,紧急停机。	580.00 507.90	289.3	183.67	70.1	39.4	76.2	27.3	97.9	-6.1

(3) 机组转速最大升高

$$\beta_{\text{max}} = \frac{n_{\text{max}} - n_r}{n_r} \quad (2)$$

式中: n_{max} 为机组甩负荷后最大转速(r/min); n_r 为机组额定转速,本电站大机组 n_r 为 125 r/min,小机组 n_r 为 333.3 r/min。

结果分析:

① 水轮机在额定水头发额定出力的情况下,1[#]机组甩负荷后最大转速升高发生在 1[#]、4[#]机同时运行,同时甩全负荷至空载运行,1[#]机组最大转速上升率 $\beta = 43.8\%$ 。

② 水轮机额定水头下发最大出力的情况下,1[#]机组最大转速上升率发生在四台机组运行,1[#]~3[#]机在额定水头下超发 5%,1[#]、4[#]机甩全负荷至空载运行的工况下,机组最大转速上升率 $\beta = 48.9\%$ 。

③ 4[#]机机组最大转速升高发生在四台机运行,

1[#]~3[#]机在额定水头下超发 5%时,1[#]、4[#]机甩全负荷至空载运行,4[#]机组最大转速上升率 $\beta = 53.6\%$ 。

针对 $GD^2: 4.0 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 直线关闭, $T_{\text{总}} = 8 \text{ s}$ 时本电站的在系统中所占的容量,机组转速上升率裕度较大,可以较大范围内满足电站正常运行,具体见表 2。

(4) 转轮出口最低压强水头 H_B

机组甩负荷后由于导叶将机组水流截断,极易在转轮后出现压力降低的情况。转轮出口最低压强水头通常可用下式来计算:

$$H_B = (Z_{\nabla\text{安}} - Z_{\nabla\text{下}}) + \frac{v^2}{2g} + \Delta H_B \quad (3)$$

式中: v 为转轮出口流速(m/s); ΔH_B 为尾水管水流惯性水击压强(m); $Z_{\nabla\text{下}}$ 为计算工况时下游水位。

结果分析:

① 水轮机在额定水头发额定出力的情况下,1#机转轮出口最低压力发生在上游死水位,1#机运行,甩全负荷,紧急停机,转轮出口最低压强水头为-6.1 m。

② 水轮机在额定水头发最大出力的情况下,1#机转轮出口最低压力发生在上游死水位下,1#机超发5%运行,甩全负荷,紧急停机,转轮出口最低压强水头为-7.3 m。

③ 4#机转轮出口最低压力发生在上游死水位下,4#机运行,甩全负荷,紧急停机,转轮出口最低压强水头为-6.7 m。

可以在 $GD^2:4.6 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 直线关闭, $T_{\text{总}} = 8.5 \text{ s}$ 时看出影响转轮出口压力最主要的因素是下游水位及机组引用流量。根据规范要求转轮出口压强水头不应低于-7.5 m, 本电站在安全范围内, 具体见表3。

表2 马马崖一级水电站4#机(生态机组)大波动过渡过程计算结果

序号	计算工况	上游水位 下游水位 /m	Q /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	N /MW	水轮机 净水头 /m	机组 β /%	H_0 /m	ξ /%	H_{max} /m	尾水管 最小水压 /m
1	四台机组同时运行,1#~3#机在额定水头下超发5%,1#、4#机甩全负荷至空载运行。	$\frac{583.90}{511.80}$	29.78	18.65	69.0	50.6	77.7	31.0	103.4	0.6
2	正常蓄水位下,四台机组运行,1#~3#机超发5%,1#、4#机同时甩全负荷,紧急停机。	$\frac{585.00}{511.80}$	28.5	8.65	70.7	40.5	79.4	28.1	104.8	-3.3
3	校核洪水位下,四台机组运行,1#~3#机超发5%,1#、4#机同时甩全负荷,紧急停机。	$\frac{590.29}{538.99}$	25.7	11.5	49.0	30.4	85.5	24.8	106.5	27.4
4	四台机组运行,1#~3#机在额定水头下超发5%时,1#、4#机甩全负荷至空载运行。	$\frac{583.90}{511.80}$	29.78	18.65	69.0	53.6	77.7	29.7	103.6	-4.1
5	1#、4#机组运行,1#机在额定水头下超发5%,4#机甩额定负荷,紧急停机。	$\frac{580.40}{508.30}$	29.78	18.65	69.0	52.2	74.1	28.7	99.8	-4.2
6	上游死水位,4#机运行,甩全负荷,紧急停机。	$\frac{580.00}{504.62}$	27.25	18.65	74.5	46.0	74.9	22.7	93.8	-6.7

表3 马马崖一级水电站1#机低水头大波动过渡过程计算结果

序号	计算工况	上游水位 下游水位 /m	Q /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	N /MW	水轮机 净水头 /m	机组 β /%	H_0 /m	ξ /%	H_{max} /m	尾水管 最小水压 /m
1	正常蓄水位,四台机组运行,1#~3#超发5%时,1#、4#机甩全负荷,紧急停机。	$\frac{585.00}{511.80}$	304.0	192.854	71.0	38.0	80.6	25.9	105.80	-4.4
2	校核洪水位,四台机组运行,1#~3#超发5%时,1#、4#机甩全负荷,紧急停机。	$\frac{590.29}{538.99}$	273.5	120.4	49.2	31.8	86.6	26.8	107.90	25.7
3	1#、4#机组运行,1#机额定水头下超发5%时,1#、4#机甩全负荷至空载运行。	$\frac{580.15}{508.30}$	319.0	192.854	69.0	48.9	75.4	31.5	101.0	-6.9
4	1#、4#机组运行,1#机额定水头下超发5%时,1#、4#机甩全负荷,紧急停机。	$\frac{580.15}{508.30}$	319.0	192.854	69.0	47.6	75.4	31.6	101.05	-7.0
5	四台机组同时运行,1#~3#机额定水头下超发5%,1#、4#机同时甩全负荷至空载运行。	$\frac{583.65}{511.80}$	319.0	192.854	69.0	48.9	78.9	31.4	104.42	-4.3
6	四台机同时运行,1#~3#机额定水头下超发5%,1#、4#机同时甩全负荷,紧急停机。	$\frac{583.65}{511.80}$	319.0	192.854	69.0	47.6	78.9	31.6	104.6	-4.4
7	上游死水位,1#机超发5%运行,甩全负荷,紧急停机。	$\frac{580.00}{508.09}$	314.17	192.854	69.6	45.4	75.6	30.2	99.9	-7.3

4 结 语

(1) 马马崖一级电站在电网系统中承担调峰、调频及事故备用任务。对于机组和过水建筑物而言,大波动过渡过程计算结果和甩负荷计算结果是机组和过水建筑物设计的重要理论依据。计算表明,水轮机调速器设置外加能源的多级液压放大系统,会增加执行元件的惯性,不利于调节。

(2) 当导叶开度变化较快时,管道内水流惯性会引起水击(锤)效应,它与调节作用相反并恶化调节过程。

(3) 由计算结果可知,水轮机调速器需配备具有双重调节能力的执行机构。

参考文献:

- [1] 李庆铁,李传夫,屈文杰,等.刚果(金)ZONGO II 水电站工程水力过渡过程数值计算[J].水利水电工程设计,2014,33(3):34-36.
- [2] 林劲松,巨江,诸亮,等.水电站水力过渡过程仿真计算的工程应用[J].水力发电学报,2010,29(1):31-36.
- [3] 吴维金,朱亚军.老木孔水电站机组及下游河道的水力过渡过程计算[J].小水电,2012,(4):19-22.
- [4] 向培林,聂光利,张海江,等.毛尔盖水电站水力过渡过程计算[J].四川水力发电,2011,30(2):110-113,172.
- [5] 陈祖文.水电站水力过渡过程计算工作量量化探索[J].贵州水力发电,2011,25(2):70-73.

- [6] 赵亮,杨建东,石卫兵,等.白莲河抽水蓄能电站首台机组低扬程下水泵工况抽水断电水力过渡过程研究[J].2009,7(3):129-131,148.
- [7] 巨江,诸亮,刘蔷,等.水电站水力过渡过程数值仿真的理论与实践[J].西北水电,2009,(3):1-6.
- [8] 穆祥鹏,练继建,刘瀚和.复杂输水系统水力过渡的数值方法比较及适用性分析[J].天津大学学报,2008,41(5):515-521.
- [9] 高志芹,吴余生,杨建东.基于进化策略的水电站水力过渡过程优化方法研究[J].水力发电学报,2008,27(1):139-144.
- [10] 赵亮,杨建东,石卫兵,等.白莲河抽水蓄能电站首台机组低扬程下水泵工况抽水断电水力过渡过程研究[J].水利与建筑工程学报,2009,7(3):129-131,148.
- [11] 杨建东.导叶关闭规律的优化及对水力过渡过程的影响[J].水力发电学报,1999,(2):75-83.
- [12] 郑源,刘德有.供水管道系统水力过渡过程研究计算[J].水泵技术,2000,(5):8-11.
- [13] 巨江,刘蔷,诸亮,等.水电站引水-尾水管道系统水力过渡过程模型试验与计算[J].水利学报,2005,36(10):1165-1170.
- [14] 张健,卢伟华,范波芹,等.输水系统布置对抽水蓄能电站相继甩负荷水力过渡过程影响[J].水力发电学报,2008,27(5):158-162.
- [15] 朱红耕.H/D 值对肘形进水流道水力特性影响的数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2004,4(2):8-10,26.

(上接第 89 页)

- [8] 张念强,谭徐明,马建明,等.城市洪水风险图编制的若干问题与探讨——以成都市洪水风险图编制为例[C]//中国水利学会青年科技论坛,2008:226-230.
- [9] 刘仁义,刘南.一种基于数字高程模型 DEM 的淹没区灾害评估方法[J].中国图象图形学报,2001,6(2):118-121.
- [10] 袁红梅,邓彩琼.应用 GIS 技术制作洪水风险图[J].江西水利科技,2004,30(4):198-201.
- [11] 刘小生,陈英俊,黄玉生.基于 GIS 技术的洪水淹没区确定[J].测绘科学,2007,32(5):136-137.
- [12] 张情,贾艾晨.基于 GIS 的中小河流典型洪水淹没图编制研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):181-184.
- [13] 陈秀万.遥感与 GIS 在洪水灾情分析中的应用[J].水利学报,1997,(3):70-73.
- [14] 李炜.水力学计算手册(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [15] Liu Feng, Ruan Xiao E. Wavelet - based diffusion approaches for signal denoising[J]. Signal Processing, 2007, 87(5):1138-1146.
- [16] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3):425-455.
- [17] 中华人民共和国水利部.SL483-2010.洪水风险图编制导则[S].北京:中国水利水电出版社,2010.