

# 嘉陵江亭子口水利枢纽防洪调度初探

张建明

(嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司,四川 苍溪 628400)

**摘要:**嘉陵江中上游汛期来水极不均匀,亭子口水利枢纽作为嘉陵江干流开发中唯一的控制性工程,枢纽库容较大,调节能力较强,在尚未承担防洪任务的蓄水初期已经凸显出其防洪效益。理论和实践度表明,预报调度的效益是显著的。随着亭子口水利枢纽工程的正常蓄水运行,如何进行科学防洪调度,在确保度汛安全的前提下,合理管理洪水资源,提高水能利用率,增加发电、灌溉、航运等综合效益,还需在正常蓄水运行后结合实际调度工作持之有效地进行探索,开展优化调度工作。

**关键词:**嘉陵江;亭子口水利枢纽;洪水特性;防洪调度

**中图分类号:**TV6;TV87

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2014)06-0093-04

## 0 前言

亭子口水利枢纽是嘉陵江干流开发中唯一的控制性工程,是川东北地区骨干调峰电源。2013年6月18日,亭子口水利枢纽工程开始下闸蓄水,8月9日首台机组72小时试运行成功,正式并网发电。2014年5月1日,实现全部机组并网发电。初期蓄水运行第一年,亭子口水利枢纽即经受住了2013年的洪水考验,成功调蓄了多场洪水,并有效的进行了错峰,初显出其巨大的防洪效益。

如何科学合理的进行水库防洪调度,实现防洪减灾、提高洪水资源利用率,一直是水库调度工作的重要基础。笔者根据水库所在流域来水特性,对亭子口水利枢纽防洪调度方式进行了叙述,并对工程初期蓄水在防洪调度进行的工作进行了总结分析,为水库日后实际防洪调度运行提供参考。

## 1 工程概况

亭子口水利枢纽位于四川省广元市苍溪县境内,下距苍溪县城约15 km,是嘉陵江干流开发中唯一的控制性工程,以防洪、灌溉及城乡供水、发电为主,兼顾航运,并具有拦沙减淤等效益的综合利用工程。水库正常蓄水位458.00 m,防洪限制水位447.00 m,死水位438.00 m,设计洪水位461.30 m,校核洪水位463.07 m,总库容40.67亿 $m^3$ 。水库预留防洪库容10.6亿 $m^3$ (非常运用时为14.4亿 $m^3$ ),可灌溉农田292.14万亩,电站装机1100 MW,通航建筑物为2×500吨级,工程等别

为I等,工程规模为大(1)型。工程坝型为混凝土重力坝,河床中间布置8个表孔、5个底孔及消能建筑物,底孔(兼作排沙孔)布置在表孔左侧,河床左侧布置坝后式电站厂房,河床右侧布置垂直升船机,两岸布置非溢流坝段。

## 2 暴雨洪水特性

嘉陵江流域径流主要来源于降水,其次为地下水 and 融雪水补给。径流年内变化与降水量基本一致,年内年际变化均较大。

亭子口以上流域降水的总趋势是由南向北递减,各站多年平均降水量为400~1200 mm,面平均雨深720 mm。本流域大暴雨的天气系统主要为西南低涡、低槽冷锋、低空急流和切变线。由于天气形势和影响降水的天气系统以及地形条件的不同,使得暴雨分布在地区上和季节上均有差异。亭子口以上流域暴雨多发生在4~10月,80%的暴雨发生在7~9月。单站暴雨持续时间最长可达3天。

亭子口控制流域洪水主要由暴雨形成,属陡涨陡落型洪水,年最大洪水发生时间以7、8、9三个月最多,6月次之,5、10月亦偶有发生,但量级较小。7~9三个月主汛期洪峰出现次数占全年84.7%,其中出现在7月份的机率最大为38.5%,其次是9月为25.0%。嘉陵江一次暴雨过程约5~7天,其中主峰历时2~3天,一次洪水过程约为3~7天,峰顶时间一般为0.5~2小时,洪水过程线形状多为单峰,当嘉陵江上游与白龙

收稿日期:2014-10-31

江及区间降水时间错开时,也时常出现双峰或多峰的洪水过程。

#### 4 防洪任务及调度原则

防洪调度的任务是根据设计确定的枢纽工程设计洪水、校核洪水和下游防护对象的防洪标准,按照设计的调洪原则,在保证枢纽工程安全的前提下,拦蓄洪水和按规定控制下泄流量,尽量减轻或避免下游洪水灾害。

##### 4.1 防洪任务

依据设计报告,亭子口水库的防洪任务为:有效控制嘉陵江洪水,提高下游沿江城镇的防洪能力,使南充市、阆中市以及苍溪、南部、仪陇、蓬安、武胜等县城的防洪标准由20年一遇提高到50年一遇,将下游沿江乡镇、相对集中居民区及农田的抗洪能力由2年一遇提高到10年一遇,在长江中下游遭遇较严重灾情洪水或嘉陵江中下游遭遇超标洪水时,削减长江中下游成灾水量或者大幅减轻嘉陵江中下游洪灾损失。

##### 4.2 正常运行期水库调度原则

亭子口水库的正常运行期调度原则为:汛期6月下旬~8月底控制兴利水位不超过防洪限制水位447 m;9月初水库开始蓄水,一般情况下,9月中、下旬可蓄至正常蓄水位458 m;10~12月维持正常蓄水位运行;1~4月为供水期,电站一般按保证出力发电,正常情况下控制供水期末库水位不低于死水位438 m;当遭遇较丰来水年份,5~6月运行水位较高,要求6月中旬迫降库水位,中旬末将库水位降至防洪限制水位447 m。

##### 4.3 水库下游防护区防洪调度

亭子口水库对嘉陵江中下游的防洪调度方式采用“固定下泄量法”和“补偿调度”相结合的防洪调度方式。具体调度方式如下:

汛期亭子口水库来水 $Q_{*} < 10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,亭子口水库水位按防洪限制水位控制运行;当来水 $Q_{*} \geq 10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,按以下方式调度:

(1)当南充未出现汛情(南充流量 $< 20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )时,采用“固定下泄量”方式调度。当亭子口水库来水 $Q_{*}$ 介于 $10\ 000 \sim 18\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ (2~10年一遇)时,亭子口水库按 $Q_{泄} = 10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 控制下泄,以保护下游沿江乡镇和农田为目标;

(2)当亭子口水库来水 $Q_{*} \geq 18\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 或南充流量 $\geq 20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,采用“补偿调度”方式

运用,以保护南充等城镇为目标。

①亭子口水库的下泄流量为南充的安全泄量扣除上时段亭-金(亭子口至金银台)区间来量及上时段亭-金区间上涨流量,并扣除建设乡水文站及未控区间流量;若 $Q_{泄}$ 小于机组满发流量 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ ,按 $Q_{泄} = 1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 控制,将其余洪水拦蓄于水库内。

即: $Q_{亭泄(t)} = Q_{南安} - K \times \{ Q_{清(t-1)} + [ Q_{清(t-1)} - Q_{清(t-2)} ] \} - Q_{建、未控}$

②当南充洪水不超过50年一遇时,控制库水位不超过防洪高水位;

③当南充发生超标洪水或长江中下游遭遇严重灾情洪水时,根据当时需要动用水库预留的非常运用防洪库容,作为可能采用的临时措施。

(3)下游退水后,视水情适当加大水库泄量,使水库尽快消落至防洪限制水位,腾空防洪库容,以备下一次洪水的到来。

式中  $t$ ——一场洪水过程的时段数, $t=1,2,\dots,n$ ;  $Q_{亭泄}(t)$ ——本时段亭子口水库泄流量;  $Q_{南安}$ 为南充河道安全泄量, $25\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ ;  $K$ 为亭-金区间流量扩大系数,取1.2;  $Q_{清(t-1)}$ 为上时段清泉乡水文站来水流量;  $Q_{清(t-1)} - Q_{清(t-2)}$ 为上时段清泉乡水文站来水流量涨率;  $Q_{建、未控}$ 为南充发生洪水时建设乡水文站及未控区间流量。取值如下:当南充流量 $\leq 25\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,取 $6\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ ;当 $25\ 000\ \text{m}^3/\text{s} < \text{南充流量} \leq 28\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,取 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ;当南充流量 $> 28\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,取 $7\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

#### 5 防洪调度

常规防洪调度一般采用洪水形成、发展过程中额实际库水位、实际入库流量作为判断洪水量级大小及相应泄量的判别指标。防洪预报调度一般采用洪水预报信息中的累积净雨量、入库洪水流量作为判断洪水量级大小及相应泄量的指标。在实际防洪调度中,利用实时洪水预报信息进行实时预泄调度,则可腾空部分防洪库容,使水库的抗洪能力提高或削减洪峰,最大限度地保护下游防护点的防洪安全。亭子口水利枢纽工程在水库蓄水运行初期,在实际防洪预报调度方面做了一些探索,并在首年蓄水运行取得了较好的防洪、发电等综合效益。

##### 5.1 水情水调自动化系统

水库流域水情自动测报系统的稳定性、可靠性是实施防洪预报调度的先决条件。2009年亭子口水利枢纽工程施工期水情自动测报系统便组建完成并投入运行。2013年,随着首台机组的投产运行,电站开始转入并网运行,对水情测报工作也提出了更高的要求。为增长预见期和提高预报精度,在施工期水情自动测报系统的基础上进行续建完善。

目前,亭子口水利枢纽水情自动测报系统规模为1:35。35个遥测站中,有9个水位雨量站、25个雨量站和1个气象站,覆盖略阳至亭子口坝区。遥测站采用GPRS/GSM和北斗卫星的通信方式,抗干扰强,通畅率高,确保了水情遥测数据的完成性、可靠性、及时性。

## 5.2 洪水预报方案

通过研究嘉陵江流域水文气象特征、洪水组成及遭遇规律、水文气象预报水平、洪水预报新技术新方法,科学编制洪水预报方案,指导水库实时蓄泄,是水库进行防洪预报调度的重要内容。洪水预报方案的合理性直接影响着调度决策的正确与否。

针对嘉陵江流域独特的流域水文气象特性,亭子口水利枢纽洪水预报方法主要采用流域降雨径流预报和河段流量预报方法。根据水文预报精度和预见期的需要,结合亭子口水情自动测报系统遥测站点的建设与河段控制情况,将坝址以上控制流域面积分为4个区块,即略阳—广元区块,上寺以上区块,广元、三磊坝、上寺—昭化区块,昭化—亭子口区块(河长及平均传播时间见图1),分别对四个区块进行预报演算。

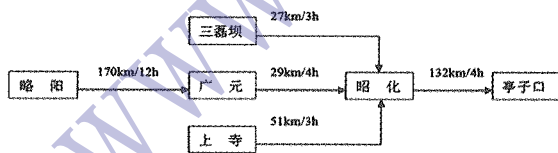


图1 嘉陵江略阳至亭子口河长及平均传播时间示意图

根据《水文情报预报规范》(GT/T 22482-2008)规定,利用洪水样本进行建模和综合检验,预报方案各项评定要素的合格率均为乙等以上。结合重要断面的水位变化过程,通过5年实际预报工作不断修正,场次洪水预报精度均在80%以上,满足枢纽汛期运行调度对洪水预报的要求,为

防洪调度决策提供了有力的技术支撑。

## 5.3 梯级流域水库群联合调度

嘉陵江亭子口水利枢纽工程以上流域水利工程数量较多,特别是支流白龙江上有碧口和宝珠寺电站。碧口水库总库容为4.5亿 $m^3$ ,有效库容2.21亿 $m^3$ ,为季调节水库;宝珠寺电站总库容25.5亿 $m^3$ ,调节库容13.4亿 $m^3$ ,为年调节水库。碧口、宝珠寺电站的蓄放水对亭子口电站影响较大。为了及时全面掌握上游水情,确保工程安全度汛及防洪调度运用,亭子口水利枢纽与宝珠寺水库建立了长期水情报讯关系。

与此同时,按照长江防总办公室统一部署的长江上游控制性水库群联合调度方案,亭子口水利枢纽积极开展长江上游水库群信息共享等工作,为后续开展流域水库群联合调度探索,充分发挥水库的综合效益提供了有效的基础数据。

## 5.4 常遇洪水调度

在工程设计中,汛限水位是根据有一定稀遇程度的全年设计洪水计算而确定的,当发生较大洪水时,亭子口水利枢纽根据下游防洪需求进行防洪运用。但洪水的发生为随机事件,并不是每年都有大洪水发生,特别是稀遇洪水,往往是几十年甚至更长时间才发生一次;而年内,在长达半年的汛期内,并非每月或每旬都会发生较大洪水,一般情况,不同月份间或分期间洪水量级有较明显的差别,主汛期相对于其他时期的洪水量级要大得多,因此,一般年份水库对汛期发生的常遇洪水可以进行适当拦蓄,调洪水位可据预报预泄研究成果实施动态控制。

近年来,水资源供需矛盾突出,电力严重短缺,因此,从合理利用汛期的常遇洪水,提高洪水资源利用率的角度出发,亭子口水电站与长江上游水文水资源勘测局协作开展了亭子口水利枢纽常遇洪水实时预报预泄调度技术研究工作。

通过研究嘉陵江流域水文气象特征、洪水组成及遭遇规律、水文气象预报水平、洪水预报新技术新方法、各水库预报预泄能力及下游河道安全泄量等,对各设计频率洪水、典型大洪水进行调洪演算及下游河道洪水演进计算,在不降低水库防洪标准、不增加下游防洪压力和防洪风险完全可控的前提下,合理利用洪水资源,提出了水库常遇洪水实时预报调度的启动条件及操作控制指标。

### 6 2013年防洪调度

2013年汛期,亭子口水利枢纽坝址以上控制流域内多次发生持续性强降雨,洪水发生之频繁历史罕见。面对严峻的防汛形势,经过准确预报,精心调度,积极有效地拦洪、预泄、消峰、错峰,亭子口水利枢纽工程顺利度过汛期。同时,为提高下游梯级电站综合效益,缓解下游防汛压力,积极配合下游区域地方政府抢险救灾发挥了重要作用。

#### 6.1 主汛期防洪调度

2013年主汛期(6月下旬-8月底),亭子口水库平均入库流量 $2\,340\text{ m}^3/\text{s}$ ,总入库水量

$149.54\text{ 亿 m}^3$ ,占全年多年平均来水量的79%。期间亭子口水库共遭遇12次明显涨水过程,其中洪峰流量为 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下的3次, $5\,000-8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的5次, $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的4次。洪水发生之频繁为近几年较为少见。最高洪水位 $453.72\text{ m}$ ,发生在9月27日10时;最大1次入库洪峰流量为 $11\,800\text{ m}^3/\text{s}$ ,发生在6月21日;最大出库流量为 $5\,800\text{ m}^3/\text{s}$ ,发生在7月4日。

2013年主汛期亭子口水库4次较大洪水过程防洪调度统计情况见表1,日平均出入库流量过程见图2。

表1 2013年主汛期亭子口防洪调度统计表

年份	编号	最大洪峰 $\text{m}^3/\text{s}$	72 h 洪量 /亿 $\text{m}^3$	出现时间	消减洪峰 / $\text{m}^3/\text{s}$
2013年	1	11 800	14.16	6月21日	10 700
	2	9 780	10.81	7月4日	3 980
	3	11 000	10.82	7月22日	5 250
	4	9 420	8.96	8月7日	4 620

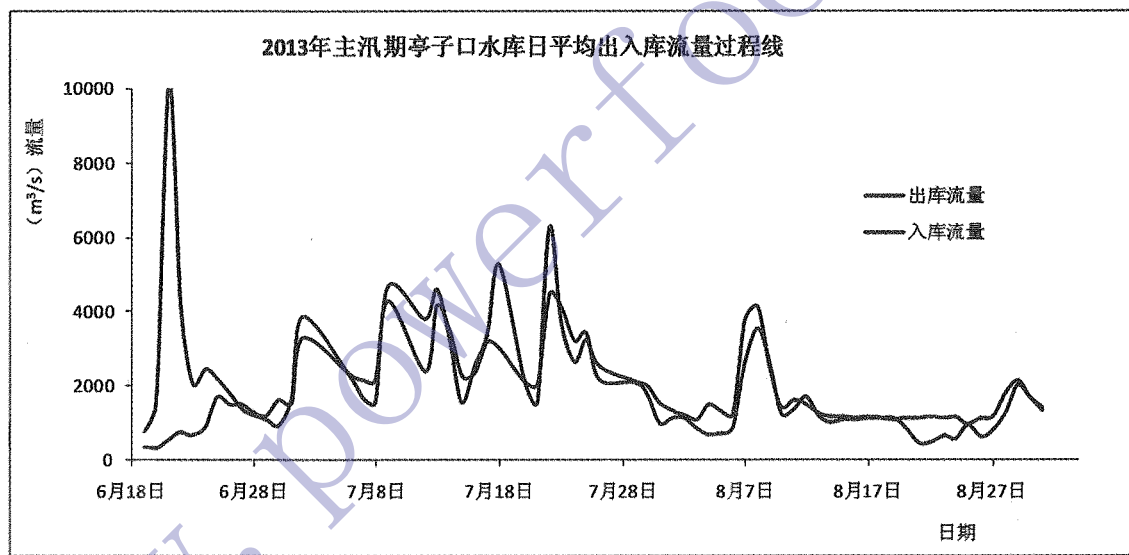


图2 2013年主汛期亭子口水库日平均出入库流量过程线图

#### 6.2 后汛期防洪蓄水调度

2013年后汛期,通过气象预报分析,9月初预报本月中下旬亭子口坝址上游流域有一次明显降雨过程,将形成一次较大径流过程。结合预报成果,经过与四川省电力部门的沟通协调,于9月18日前将库水位从 $451.11\text{ m}$ 通过加大发电出力降至 $448.33\text{ m}$ ,腾出库容约3亿 $\text{m}^3$ 。9月19日,洪水入库,洪峰流量达 $5\,790\text{ m}^3/\text{s}$ 。洪峰过后拦蓄洪尾,库水位蓄至 $453.72\text{ m}$ 。

通过对此次后汛期洪水的成功调蓄,重复利用库容增发发电量约6 000万kWh,做到了防汛发

电两不误,为“两节”保电做出了贡献。

### 7 结语

嘉陵江中上游汛期来水极不均匀,亭子口水利枢纽作为嘉陵江干流开发中唯一的控制性工程,枢纽库容较大,调节能力较强,在尚未承担防洪任务的蓄水初期已经凸显出其防洪效益。理论和实践度表明,预报调度的效益是显著的。随着亭子口水利枢纽工程的正常蓄水运行,如何进行科学防洪调度,在确保度汛安全的前提下,合理管理洪水资源,提高水能利用率,增加发电、灌溉、航

(下转第103页)

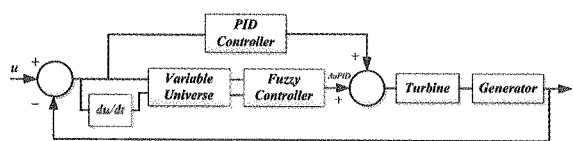


图2 高精度模糊控制器模型

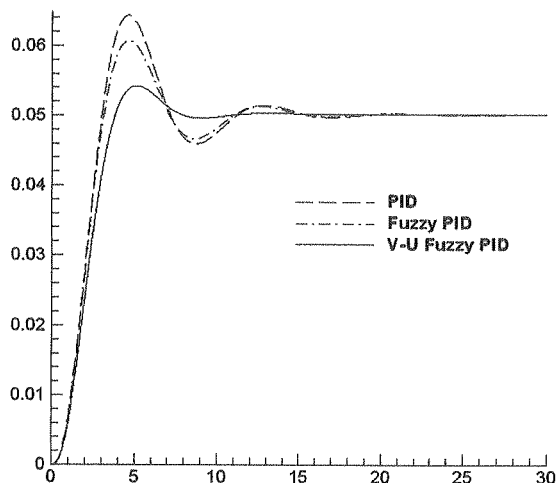


图3 发电机频率变化5%时阶跃响应

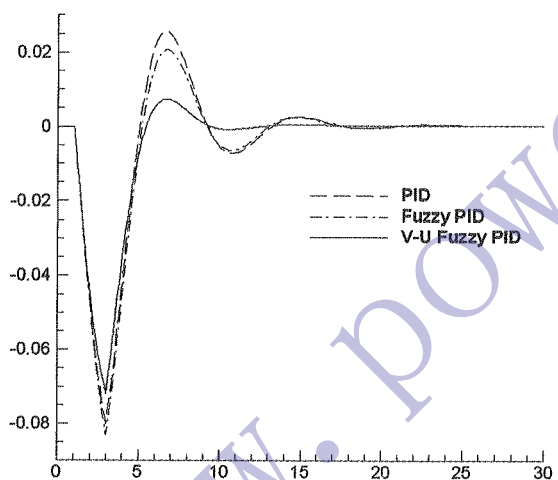


图4 甩10%负荷时的发电机转速阶跃响应

0.69,  $e_{gh}=0.51$ ,  $T_{\omega}=1.45$  s,  $T_a=5.66$  s,  $e_g - e_x = 1$ 。以下我们分别对比传统PID控制器、模糊PID

控制器和高精度模糊控制器分别在两种工况下的状态响应。

(1)无负载扰动的情况下,增加2.5Hz的频率扰动。

(2)无频率扰动的情况下,加入10%的负载扰动,见图4。

#### 4 结论

通过传统PID控制器、模糊PID控制器和高精度模糊PID控制器在频率扰动和负荷扰动两种工况下的扰动可以清晰的看到,高精度模糊控制器相比于另外两种控制器,动态特性好,曲线过冲小,较强的抗扰动能力;调节能力强,速度快且过程平稳;鲁棒性强,综合性能较优。是一种行之有效的控制方法,该高精度模糊控制器在工业系统控制中将有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E辑), 1999,29(1):32-42.
- [2] 李洪兴. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E辑),2004,32(2):211-223.
- [3] 陈国平,孙培德,李俐,等. 模糊控制器在水轮机调节中的应用及Simulink仿真[J]. 水力发电,2006,32(7):53-55.
- [4] 喻菁,周建中. 模糊PID控制在水轮机调节中的应用研究[J]. 水利科技,2003,1:49-54.
- [5] 李洪兴. Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J]. 控制理论与应用,1997,14(6):868-872.
- [6] 田勇,沈祖诒. 水轮机调解中高精度模糊控制器的应用[J]. 水利水电科技进展,2006,26(5):55-58.
- [7] Zadeh L A. Fuzzy Sets[J]. Information and Control,1965,8:338-353.
- [8] 李勇. 水轮机调节系统模糊PID控制器设计及仿真研究[J]. 工程技术,2010,75-79.

#### 作者简介:

曹欢(1984-),男,湖北钟祥人,工程师,电气工程及其自动化本科专业毕业,从事水电厂运行维护工作;

杨棣(1990-),男,山东无棣人,助理工程师,热能与动力工程本科专业毕业,从事水电厂运行维护工作。

(责任编辑:卓政昌)

(上接第96页)

运等综合效益,还需在正常蓄水运行后结合实际调度工作持之有效地进行探索,开展优化调度工作。

#### 参考文献:

- [1] 长江勘测规划设计研究有限责任公司 嘉陵江亭子口水利

枢纽初步设计报告 2009.

- [2] 谭培伦 谭启富 周棣华 关于水库防洪调度若干问题的探讨 1994.

#### 作者简介:

张建明(1986-),男,河南灵宝人,助理工程师,从事水电站机水库调度管理工作。

(责任编辑:卓政昌)