

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221876

# 考虑区域小水电出力特征的预报调度研究

宋兴荣<sup>1</sup>, 张弘强<sup>1,2</sup>, 田海平<sup>1,2</sup>, 隆院男<sup>3</sup>, 宋昕熠<sup>3</sup>, 唐 颖<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 高效清洁发电技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410007; 3. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 小水电作为农村能源的重要组成部分,为带动农村经济发展,促进节能减排作出了重大贡献。但目前大部分地区小水电在优化运行的过程中缺乏科学指导。为此,以猛洞河流域为例,建立了基于径流模拟的梯级小水电优化调度模型。首先,结合新安江模型和曼宁公式,构建半分布式水文模型模拟水库运行对河道径流过程的影响;其次,基于逐次逼近动态规划法,结合小水电实际运行特征,求得最优调度方案。结果表明,构建的半分布式水文模型在该流域拟合效果较好,模拟与实测径流过程的变化趋势基本一致,序列间纳什效率系数和决定系数均为 0.86;优化调度模型可有效减少电站弃水,提升流域水资源利用效率,且优化调度过程能充分符合小水电在日内的运行规律,具有实际应用价值。

**关键词:** 小水电; 半分布式水文模型; 优化调度; 运行特征

**中图分类号:** TV736

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)09-0051-04

## 1 概况

猛洞河流域位于湖南省湘西永顺县,为永顺县境内水能资源蕴含量最大的河流,地势偏僻,区域电力供应不充足。猛洞河为沅江二级支流,流域地理位置、地形、水系等基本情况见图 1。流域多年平均降雨量为 1 540.8 mm,年内及年际分配不均。猛洞河干流上共建设有 10 座水电站,均属

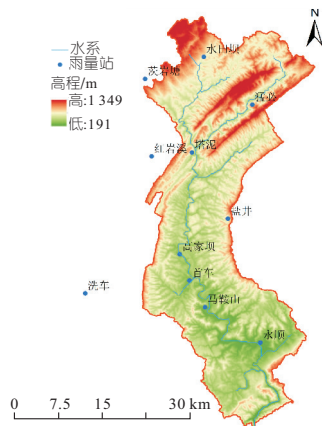


图 1 猛洞河流域地理信息概况

Fig. 1 Geographic information of the Mengdong River Basin

于小型水电站(装机容量 $\leq 25$  MW)。其中,高家坝、马鞍山、海螺三座电站具备调节能力(小 I 型电站),调节库容介于  $260 \times 10^4 \sim 5\ 200 \times 10^4$   $m^3$  之间。我国小水电资源丰富,通过优化调度技术可进一步发挥中小流域的发电潜能,对促进社会经济发展,减少碳排放具有重要意义。水电站优化调度通常的流程为在降雨径流预报的基础上,结合调度模型,综合考虑不同约束条件,确定电站的优化调度方案。然而,小水电在实际运行中仍以经验调度为主,普遍存在以下问题:①小水电所在流域降雨径流关系不明确,不能为之后的运行调度提供指导。②小水电运行方式粗放,流域上下游水电站整体运行协调存在不足,流域水能利用率低,且不利于电网电压的均衡稳定<sup>[1-2]</sup>。为优化小水电运行管理模式,优化调度模型需综合考虑其实际运行特点。为此,本文以猛洞河流域地形资料为基础,构建半分布式降雨径流模型,模拟了不同电站上游来水和区间径流过程,并以传统优化调度方法为基础,将出力最大和弃水最小设定为主要目标,在考虑库容、水位、装机等传统约束条件的同时,进一步结合小水电实际运行规律,

收稿日期: 2022-09-27, 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A521003A); 国家自然科学基金项目(52079010); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-45); 湖南省重点研发计划项目(2020SK2130)

作者简介: 宋兴荣(1976-),男,高级工程师,研究方向为电力系统,E-mail: songxr@hn. sgcc. com. cn

通讯作者: 张弘强(1990-),男,博士、工程师,研究方向为水利工程,E-mail: zhq831807@163. com

完成梯级小水电的优化调度工作。

## 2 数据来源及小水电运行特征分析

### 2.1 数据来源

气象资料包括来凤、吉首、桑植、沅陵、永顺气象站的降雨/蒸发皿观测资料以及 11 个雨量站的降雨资料(图 1)。资料包括 2019 年 1 月 1 日~2022 年 7 月 31 日的逐小时观测资料。

水情资料包括 2019 年全年的高家坝电站逐日入库径流过程、高家坝及海螺电站逐日坝上水位过程。各电站出力资料包括高家坝、海螺电站 2019 年逐日出力过程及三座电站 2022 年 2 月 1 日~7 月 31 日逐小时出力过程。

### 2.2 小水电运行特征分析

根据调研结果,小水电在实际运行中具有以下特征:①电站管理人员不足,通常采用开机后连续发电的模式,即在日内任一时刻开机启动后将持续发电若干小时,至休息时间或水位过低时停机;②小水电通常承担区域电网内的顶峰任务,主要在每日中午和晚上两个用电高峰期发电,夜间在不产生弃水时通常不启动发电机组。

根据 2022 年 2 月 1 日~7 月 31 日猛洞河流域高家坝、马鞍山、海螺三座电站逐小时实际出力过程统计资料,发现各电站日内发电量均存在 2 个用电高峰期,即中午 12:00 左右和晚上 18:00~22:00 这两个时段。另外,高家坝电站调节库容约为  $5\,200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,远大于马鞍山( $1\,640 \times 10^4 \text{ m}^3$ )和海螺( $260 \times 10^4 \text{ m}^3$ )电站的调节能力,即高家坝电站对上游来水具有更强的调节能力,因此其凌晨 1:00~7:00 点时段的出力占比相对更低。此外,猛洞河流域降雨量自 4 月开始增加,5~7 月为流域主汛期,河道径流量较大,各级电站凌晨出力也主要发生在汛期。各级电站在枯水期的调度能更明显地反映出小水电侧重于顶峰的调度特征。

## 3 研究方法

### 3.1 径流预报模型

为体现降雨产流特征在空间上的差异、考虑水库调蓄过程对河道流量传递的影响,本文基于新安江模型,结合基于曼宁公式的河道流量传递演算方法,建立了流域半分布式水文模型,模型的基本原理分为子流域产汇流和河道流量演算两部分。

(1)子流域降雨产汇流。以 10 m 分辨率

DEM 为基础,采用 D8 算法,结合三座电站地理位置,将猛洞河流域划分为 17 个子流域,划分结果见图 2。①产流计算。各子流域采用三水源新安江模型的原理,计算降水发生后各子流域内的蒸发、产流和土壤含水率变化过程。②汇流计算。地面汇流过程采用单位线法计算;采用线性水库模拟壤中流和地下径流的出流过程,最终得到各子流域出口的径流过程。三水源新安江模型已在湿润、半湿润地区得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。

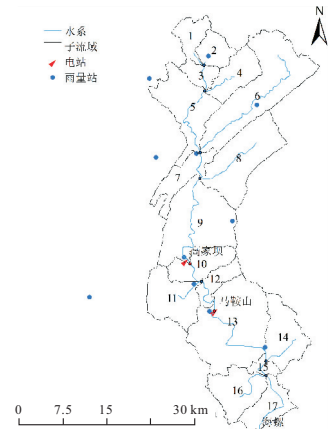


图 2 猛洞河流域子流域划分结果

Fig. 2 The sub-basin delineation in the Mengdong River Basin

(2)河道流量演算。根据高精度流域地形信息估算主河道沿程坡降、最大河宽、最大水深等基础信息,并以曼宁公式为基础模拟径流在河道内的传递过程,从而更准确地反映水库调蓄对河川径流的影响;此外,在优化调度中也可模拟电站泄水过程对下游河道径流的影响。假定河道断面为边坡比例为 2 的等腰梯形,根据最大河宽、最大水深和边坡比例计算河道底宽,进一步计算河道湿周、水力半径,确定河道最大容纳水量;当汛期地表径流超过河道容纳上限时,多余的水量将溢流至河漫滩。模型中假定河漫滩底宽为最大河宽的 5 倍。存在河漫滩时,将重新计算过水断面面积、湿周等参数。最终根据河道沿程坡降、曼宁系数、水力半径等参数,按曼宁公式计算河段内流量  $Q$  和流速  $v$ 。

### 3.2 模型参数敏感性分析及率定

为描述降雨产流特征在空间上的差异,需分别率定各子流域参数。考虑到参数数量较多,先选用 Sobol 敏感性分析方法定量评价模型输入参数的变化对输出结果的影响,为模型参数率定及模型优化提供支持(采用 python 中 SALib 包实现)。根据敏感性分析结果选定影响模拟结果的主要关键参数,进一步采用优化算法确定参数最优取值,参数自动率定时以纳什效率系数( $N_{SE}$ )最大作为寻优目标:

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{m,j} - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

式中,  $n$  为模拟时段总数;  $Q_{m,j}$ 、 $Q_{s,j}$  分别为  $i$  时刻实测、模拟径流量,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_m$ 、 $\bar{Q}_s$  分别为实测、模拟径流均值,  $m^3/s$ 。

### 3.3 考虑小水电运行特征的优化调度模型

#### 3.3.1 基本约束条件

模型中考虑的基本约束条件包括:①水库水量平衡约束;②库容约束;③出力约束;④下泄流量约束;⑤非负约束。各约束表达式与大中型电站相同。

#### 3.3.2 出力计算及目标函数

电站出力采用下式计算:

$$N_i = 9.81\gamma_i q_i H_i \quad (2)$$

式中,  $N_i$  为第  $i$  个电站的出力;  $\gamma_i$  为第  $i$  个电站的水轮机效率;  $q_i$  为第  $i$  个电站的发电引水流量;  $H_i$  为第  $i$  个电站的水头。

模型的优化目标包括弃水最小和出力最大。

#### 3.3.3 优化调度模型

以逐次逼近动态规划法为基础,建立能考虑小水电实际运行特征的梯级水库优化调度求解方法,该方法通过遍历迭代计算获取最优解,在求解大中型水库调度问题中已得到广泛运用,其求解过程详见文献[3]。

小水电调节库容较小,采用传统优化方法可能会导致优化调度结果无法应用于实际生产工作。优化调度的基本思路是减少流域总体弃水的情况下,尽量在外部约束条件下维持各级电站高水头运行;然而部分电站库区蓄水量仅能支撑电站机组在高水位下运转 2~3 h,基于传统优化调度思路往往会得到波动幅度较大出力过程,导致优化后的调度方案不具备实际可操作性。此外,水电机组爬坡速率较快,机组启动响应时间普遍为 1~2 min,本文模拟尺度为小时,可忽略机组响应时间对优化调度的影响,模型主要考虑机组启停频率的合理性,对传统调度的优化为:①出力时段优化。机组设定正常(日内 8:00~24:00)和非正常(日内 1:00~7:00)运行时段,非正常运行时间内仅在产生弃水的情况下启动机组发电;②日内顶峰需求。模型为顶峰时期(日内 12:00、18:00)设定发电系数  $\gamma(0 < \gamma < 1)$ ,当顶峰时期水库库容达到  $\gamma V_{兴}$  时,即可启动机组开始发电,以满足电网顶峰需要。③出力波动优化。模型进一步优化机组启动后的运行时间,机组启动后至正

常运行时段末或至死水位关闭机组;当调度方案中任一电站出力时长较短时,模型通过减少发电机组数量的方式以延长正常运行时段(日内 8:00~24:00 时)内的发电时间,使得优化后的出力过程能更好地应用于实际生产中。

## 4 模型应用及结果分析

### 4.1 径流模拟精度评估

采用 Sobol 方法分析不同子流域内部 12 个参数的敏感性(选用  $N_{SE}$  作为目标函数),各参数名称、意义及取值范围见表 1。根据图 2,高家坝水电站位于 9 号子流域出口,因此仅考虑 1~9 号子流域参数对模拟结果的影响时,全局敏感性分析结果见表 2。结果表明,蒸发  $K$ 、流域形状  $B$  和地表汇流参数  $U_H$  对降雨径流模拟过程影响最大。在敏感性分析的基础上,本研究主要对各子流域的蒸发  $K$ 、流域形状  $B$  和地表汇流参数  $U_H$  进行率定。

表 1 降雨径流模型参数初值及取值范围

Tab. 1 The initial values and boundary conditions for parameters of the rainfall-runoff model

参数	物理意义	初始估计值	下限	上限
$B$	流域形状参数	0.1	0	0.3
$C$	深层蒸发系数	0.11	0	0.3
$S_M$	最大自由蓄水容量/mm	20	12	30
$W_{UM}$	流域上蓄水容量/mm	20	0	30
$W_{LM}$	流域下蓄水容量/mm	75	70	100
$W_{DM}$	流域深蓄水容量/mm	80	80	120
$E_X$	自由蓄水量抛物线指	1	0.5	2
$k_g$	土壤入渗系数	0.3	0.05	0.49
$k_{kg}$	壤中流出系数	0.99	0.9	0.999
$k_{kss}$	地下水流出系数	0.6	0.6	0.8
$K$	蒸发皿系数	0.65	0.6	0.9
$U_H$	单位线参数	0.56	0.5	0.7

表 2 模型参数全局敏感性分析结果

Tab. 2 The global sensitivity analysis of model parameters

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B$	0.001	0.001	0	0.005	0.008	0.029	0.002	0.014	0.015
$C$	0	0	0	0.001	0.003	0.013	0.001	0.007	0.009
$S_M$	0	0	0	0	0.002	0.006	0	0.003	0.004
$W_{UM}$	0	0	0	0	0.002	0.003	0	0.002	0.002
$W_{LM}$	0	0	0	0	0.001	0.003	0	0.002	0.003
$W_{DM}$	0	0	0	0.001	0.002	0.006	0	0.003	0.004
$E_X$	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0
$k_g$	0	0	0	0.001	0.003	0.01	0.001	0.004	0.007
$k_{kg}$	0	0	0	0.001	0.002	0.009	0	0.004	0.010
$k_{kss}$	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0.001
$K$	0.011	0.01	0.005	0.028	0.086	0.306	0.022	0.151	0.243
$U_H$	0.001	0.001	0	0.001	0.005	0.013	0.002	0.008	0.016

以模拟的第一个月为预热期,利用剩余 11 个月的逐日过程完成模型参数的率定。高家坝电站 2019 年上游实测和模拟来水过程见图 3。由图 3

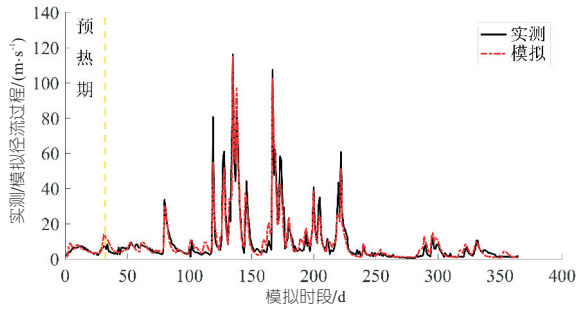


图 3 高家坝水电站实测和模拟径流过程对比

Fig. 3 Comparison of observed and simulated runoff in the Gaojiaba Hydropower Station

可知,模拟的径流过程可很好地反映实测序列的变化特征,纳什效率系数为 0.86,  $R^2$  为 0.86。

### 4.2 历史期优化调度结果分析

基于 2019 年实测的历史期电站运行调度过程,对比评估优化调度后的梯级电站对水能资源的利用效率。考虑气象预报的有效期,在优化调度时仅考虑未来 5 d 作为可预见水量。

根据 2019 年高家坝和海螺电站实际出力统计资料,两座电站全年总发电量为  $5\ 169.2 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,经优化调度可实现发电量为  $5\ 434.0 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,可增发电量约 5.12%。根据电站逐日水位过程统计资料,结合各级电站汛期、非汛期水位限制要求,对比了优化调度前后两座电站的逐日水位变化过程(图 4)。结果表明,传统运行调度过程中,各级水库均多次超出限制水位要求。经模型优化调度后,可控制各级电站库区水位变化幅度满足限制水位要求。

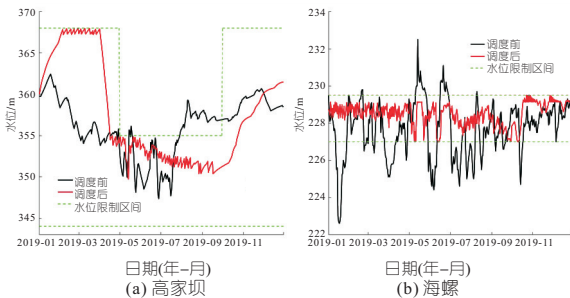


图 4 优化调度前后电站坝上水位过程变化

Fig. 4 The fluctuations of reservoir water level under original and optimal operation scenarios

此外,小水电实际运行工作中缺乏预报入库径流数据作为指导,各级电站均存在一定规模的弃水,其中高家坝水电站全年共产生弃水  $709.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,海螺水电站全年共产生弃水  $14\ 222.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。经优化调度后,高家坝水电站全年无弃水,海螺水电站弃水量降低至  $6\ 462.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,可减少弃水 56.7%(图 5)。

### 4.3 优化调度模型具体应用

2019 年度统计资料均为日尺度,无法反映小

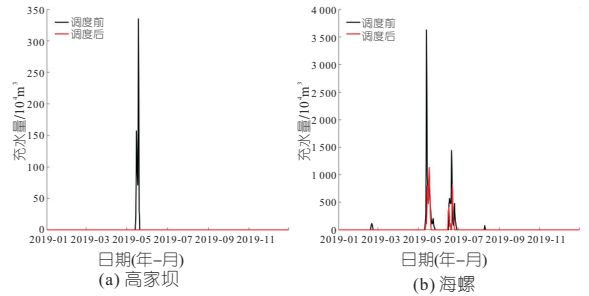


图 5 优化调度前后电站弃水量变化

Fig. 5 The fluctuations of surplus water under original and optimal operation scenarios

水电日内运行调度特征。在 2022 年度选用径流量较为充沛的时期(6 月 30~7 月 4 日)开展对比研究。结果表明,本文模型优化后的电站运行调度方式符合实际生产规律。时段内梯级水电实际总发电量为  $171.51 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,优化调度后总发电量为  $181.30 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,可实现增发电量 5.7%(图 6)。

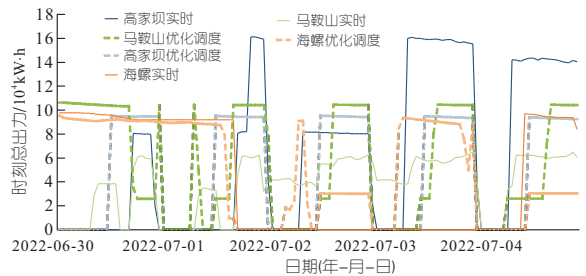


图 6 优化调度与实时运行过程对比

Fig. 6 Comparison of optimal and actual operating process

## 5 结论

a. 本文构建的降雨径流模型具有较高的模拟精度,模拟与实测径流过程的变化趋势基本一致,序列间  $N_{SE}$  为 0.86,  $R^2$  为 0.86。

b. 优化调度后的发电量较实际发电量增长了 5.12%,水电站汛期出力更为平稳,有利于电网的稳定运行。同时,弃水减少 56.7%,提高了水能利用率。

c. 优化调度后水位变化均满足限制水位要求,不仅最大化利用了水能资源,同时保证了水电站运行安全。

d. 本文预报调度模型可考虑小水电实际运行特征,在增发电量的同时,可实现小水电连续运行、用电高峰期发电等特性,具有实际应用价值。

e. 偏远地区资料不足是建立预报调度模型的主要问题,后续研究拟补充监测数据,拟合不同导叶开度下的水轮机特性曲线,更新现有数据库,提高出力模拟精度。

趋势,且不同冻融介质下损伤值大小为 3%NaCl>5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>清水。

c. 建立威布尔寿命预测模型,预测分析 3 种介质下混凝土寿命,其中清水组混凝土预测寿命远大于 3%NaCl 溶液和 5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中混凝土预测寿命,寿命预测模型较合理。

### Influence of Salt Freezing Cycle on Mechanical Properties of Concrete and Its Life Prediction

XU Cun-dong<sup>1,2,3</sup>, WANG Hai-ruo<sup>1</sup>, CHEN Jia-hao<sup>1,2</sup>, LI Zhun<sup>1,2</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, ZI Ya-hui<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Hydropower, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China; 3. Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Engineering Research Center, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** In view of the problem of rapid durability deterioration and the service reliability reduction of concrete structure caused by saline ions erosion and freeze-thaw coupling in cold and drought irrigation area in northwest China, based on the rapid indoor freeze-thaw test, mechanical property change of clean water, 3%NaCl solution, 5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution was studied in the process of freeze-thaw. The freeze-thaw damage model was established to analyze the damage degree of relative dynamic elastic modulus of concrete block for three kinds of freeze-thaw mediums. The Weibull life prediction model was used to predict the life of test specimen. The results show that the mass loss, compressive strength and dynamic elastic modulus of the concrete mass damage sizes are 3%NaCl>5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>clean water; According to Weibull life prediction model, the fitting parameters *b* and *C* were obtained, and the correlation coefficient *R*<sup>2</sup> is above 0.9; The prediction results of model life are consistent with the mechanical performance test results at different operating conditions; The mass loss, compressive strength and dynamic elastic modulus life prediction of concrete under three freeze-thaw mediums are clear water>5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>3%NaCl. It can be seen that in the environment of freezing-melting and thawing erosion, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> erosion degree is greater than Cl<sup>-</sup> erosion, and the clean water erosion degree is minimal. The research results can provide a theoretical basis for the mechanical performance characteristics research and later maintenance of concrete in cold and drought irrigation areas.

**Key words:** salt freeze; concrete; mechanical properties; Weibull model; life prediction

\*\*\*\*\*  
(上接第 54 页)

#### 参考文献:

[1] 梁雅莉,秦科源,郁娇山,等. 计及小水电的配电网电压调节策略研究[J]. 中国农村水利水电,2019(5):184-187,190.

[2] 杨亚铃,刘金涛,杨爽,等. 基于物理相似法的山丘

#### 参考文献:

[1] 孙刚锋,缙彦强. 冻融循环及硫酸盐侵蚀对混凝土耐久性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):140-144.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T50082-2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

区流域水文分类及模型参数移用方法[J]. 水电能源科学,2022,40(4):23-27.

[3] 李赫,赵燕,米玛次仁,等. 西江上游水库群联合蓄水优化调度研究[J]. 水电能源科学,2020,38(6):30-33,79.

### Reservoir Operation Based on Runoff Forecast Considering Output Characteristics of Regional Small Hydropower

SONG Xing-rong<sup>1</sup>, ZHANG Hong-qiang<sup>1,2</sup>, TIAN Hai-ping<sup>1,2</sup>, LONG Yuan-nan<sup>3</sup>, SONG Xin-yi<sup>3</sup>, TANG Ying<sup>3</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Changsha 410007, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Efficient & Clean Generation Technology, Changsha 410007, China; 3. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** As an important part of rural energy, small hydropower plays an important role in driving rural economic development and promoting energy saving and emissions reduction. However, there is a lack of scientific guidance in the process of optimal operation of small hydropower stations in most areas. This paper takes the Mengdong River basin as an example to establish a cascade optimal operation model of small hydropower stations based on runoff simulation. The Xinanjiang (XAJ) model is combined with Manning's formula to establish a semi-distributed hydrological model for simulating the influence of reservoir operation on runoff. The successive approximation dynamic programming method is used to achieve optimal operation by considering the actual operating characteristics of small hydropower stations. The results demonstrate that the semi-distributed hydrological model has a good performance in the river basin. The changing pattern of simulated and measured runoff processes is basically consistent, and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and coefficient of determination between the measured and simulated series are 0.86. The optimal operation model can reduce the spillage water effectively, which improves the utilization efficiency of water energy. Meanwhile, the optimal operation can match the actual intra-day features of small hydropower, indicating its feasibility in applications.

**Key words:** small hydropower; semi-distributed hydrological model; optimal operation; operating characteristics