

## 基于遗传模拟的水库发电优化调度模型及应用

王宗志<sup>1</sup>,刘克林<sup>1\*</sup>,程亮<sup>1</sup>,金菊良<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210029;

2 合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009)

**摘要:**为快速高效绘制适宜性强、效益高、便于操作的水库发电调度图,以常规发电调度图运行方式(时历法)作为模拟规则,以保证出力保证率满足前提下发电量最大为目标函数,借助实码加速遗传算法的并行计算能力,把调度图绘制(模拟规则)与有效性检验(智能优化)结合起来,建立水库发电优化调度模型。作为实例,应用该模型于中国某大型年调节水电站优化调度图绘制中。结果表明:该模型是有效的,可以考虑下游生态需水等水电站优化调度若干复杂约束条件与水库管理者的经验(常规调度绘制方法不能),调度图更符合实际;把调度图的绘制与有效性检验结合起来,得出的调度图无需再检验,较常规方法更为快速高效;利用了遗传算法的并行计算能力,可快速获得满足保证出力要求的多组优化调度方案(调度图),决策信息更加丰富。

**关键词:**水资源管理;水电站水库;优化调度;模拟规则;遗传算法

**中图分类号:**TV697.1

**文献标志码:**A

### Hydropower Reservoir Optimal Operation Model Combining Simulation Rules and Genetic Algorithm

WANG Zongzhi<sup>1</sup>, LIU Kelin<sup>1\*</sup>, CHENG Liang<sup>1</sup>, JIN Juliang<sup>2</sup>

(1. State Key Lab. of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Eng., Nanjing Hydraulic Research Insti., Nanjing 210029, China;

2. School of Civil Eng., Hefei Univ. of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Operating rules curves are the most commonly used tools for reservoirs management. A novel model, called hydropower reservoir optimal operation model combining simulation rules and genetic algorithm (hereafter referred to as a HROO-SRGA) was set up, which combines two processes of the formulating of the operating rule curves and their validity check. HROO-SRGA can get a set of satisfying reservoir operating rule curves which can consider the constraints of downstream the river ecological water requirement and guaranteed rate of guaranteed output of hydropower plant. This model was applied to a large annual storage plant in China, and the results showed that the proposed method is effective and can obtain many scheduling schemes which their capacity reliability and capacity are much higher than that of conventional operating rule curves did.

**Key words:** water resources management; hydropower reservoir; optimal operation; simulation rule curves; genetic algorithm

由于目前人们尚未完全掌握天气系统长期演变的客观规律,甚至还不能很好地解释已经发生的天气现象<sup>[1]</sup>,以至于绝大多数入库径流预报方法均是建立在对历史资料进行统计的基础之上。然而受观测资料系列较短、人类活动影响严重等原因,目前水库中长期降水与径流预报技术尚不能达到准确可

靠,满足调度决策精度的要求<sup>[2-3]</sup>。目前在水库实际调度中,中长期水文预报成果还仅能作为一种参考,尚不足以作为决定水库发电运行方式的主要依据。建立在若干历史场次径流资料基础之上的水库调度图仍是当前指导水库运行调度最可靠和最普遍的工具<sup>[2-5]</sup>。水库发电调度图是以时间(月、旬)为

收稿日期:2015-12-25

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51279223);国家自然科学基金面上资助项目(51479119);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301003)

作者简介:王宗志(1977—),男,教授级高工,博士。研究方向:水资源复杂系统运行调度与管理。E-mail: zzwang@nhri.cn

\* 通信联系人 E-mail: klliu@nhri.cn

网络出版时间:2016-9-13 16:48:18 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160913.1648.018.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

横坐标,以水库水位或蓄水量为纵坐标,由控制水电站发电出力的若干条指示线而划分出不同供电区的图形<sup>[2,3-6]</sup>,是水库调度规则的直观表达形式。目前常用的水库发电调度图绘制方法主要有两种<sup>[2,3-7]</sup>:一是时历法<sup>[3-5]</sup>。该方法因操作简单,在水电站水库设计阶段常被使用,但用于指导水库实际运行时存在如下不足:1)在设计阶段所引用的保证出力和保证率概念,在当年运行时没有多大实际意义;2)在绘制调度图时,只考虑了历史上发生过为数不多的几场径流过程,然而河流水文情势是复杂多变、永不重复的,因此径流代表性不强;3)调度图绘制方法尚未统一、偏经验<sup>[3-4]</sup>,需要通过大量试算才能获得相对满意方案,也不能保证获得最大的发电效益。二是随机动态规划(stochastic dynamic programming, SDP)方法<sup>[2,5-14]</sup>。该方法由于考虑了未来来水丰枯状况组合的“所有可能”,而不仅仅局限于少数几种实际发生过的径流过程,以及是通过比较水库在任何时候、任何水位情况下的“所有可能”组合而挑选出来的,因此相对于时历法具有明显的进步,但该方法受当时计算条件和认识水平所限,也存在如下不足:1)问题描述过于数学化,略显复杂和繁琐,难以被工程领域所采用;2)通过引入“惩罚系数”于目标函数,来平衡发电量和保证率之间的矛盾,进而获得满足保证出力保证率要求调度方案的做法,较之以往具有明显进步,但是需人工反复试算惩罚系数来获得相对满意的方案,计算效率不高<sup>[2,11]</sup>;3)通过假定服从特定概率分布,并考虑前后时段之间具有一定相关性来描述入库径流特性,计算复杂烦冗复杂,且计算结果受线型影响较大。更为重要的是,无论是时历法,还是基于随机动态规划的方法,当获得调度图后,其合理性和有效性,都需要通过时历法长系列模拟来进一步检验。若不满足要求,则需重新对调度图进行调整、再模拟,直到满意为止。显然,以往调度图“绘制”和“有效性检验”是分离的,也难以考虑下游生态需水等约束条件和管理者的经验。

为此,本研究以常规发电调度图运行方式为依据,考虑多种约束条件和管理者经验,建立水库发电模拟规则,即“模拟”模块,以保证出力设计保证率满足前提下的水库发电量最大为目标函数,建立“优化”模块;在此基础上采用具有并行计算能力的实码加速遗传算法作为优化工具<sup>[15-16]</sup>,把调度图的“绘制(模拟)”与“有效性检验(优化)”两个过程结合起来,构建基于遗传模拟的水库发电优化调度模型(hydropower reservoir optimal operation model cou-

pling simulation rules and genetic algorithm, HROO-SRGA)。该方法可快速获得满足保证出力保证率和复杂约束及管理经验等要求的多组水库发电优化调度方案。将 HROO-SRGA 应用于中国某大型年调节水库发电调度图绘制中,叙述方法的应用过程、验证其有效性。

## 1 HROO-SRGA 模型建立

### 1.1 优化模型

#### 1.1.1 目标函数

目标函数确切地表达了管理者的意图、实现系统最佳综合效益目标,是水库优化调度模型成功的关键<sup>[3,6,8]</sup>。保证率和发电量是水库发电调度的一对矛盾,HROO-SRGA 旨在获得满足保证出力设计保证率要求的水库发电优化调度方案,为此采用式(1)作为目标函数将多目标问题转化成单目标优化问题。

$$\max f = (P_R - P_G)E_R + E_R \quad (1)$$

式中: $P_R$  为保证出力保证率; $P_G$  为保证出力设计保证率,例如 90%; $E_R$  为计算模拟期内的发电量。式(1)的含义是选择满足保证出力保证率要求且发电量最大化的调度方案作为水库发电最优调度图。显然式(1)是满足管理者意图的。

#### 1.1.2 约束条件

1)决策变量约束 HROO-SRGA 模型的决策变量为水库发电调度图,即防弃水线 $V_{qs}(t)$ 、防破坏线 $V_{ph}(t)$ 和出力限制线 $V_{xz}(t)$ ,通常它们之间的约束关系为:

$$V_D \leq V_{xz}(t) \leq V_{ph}(t) \leq V_{qs}(t) \leq V_U(t), t = 1, 2, \dots, N_t \quad (2)$$

式中, $V_D$ 和 $V_U(t)$ 分别为 $t$ 时段允许库容下限(一般为死库容)和上限(汛限水位或正常高水位对应库容), $N_t$ 为年内时段数目加1。

2)下游河道生态需水及水轮机泄流能力约束

$$Q_{\min} \leq Q_x \leq Q_{\max} \quad (3)$$

式中: $Q_x$ 为水库泄量, $m^3/s$ ;  $Q_{\min}$ 为时段下游生态需水或其它要求流量, $m^3/s$ ;  $Q_{\max}$ 为相应于汛限水位或正常高水位的水库泄流能力, $m^3/s$ 。

4)水库水量平衡约束

$$V_2 = V_1 + (Q_i - Q_x)\Delta t - S \quad (4)$$

式中: $Q_i$ 为时段来水量, $m^3/s$ ;  $Q_x$ 为时段水库泄水量, $m^3/s$ ;  $\Delta t$ 为时段流量-水量换算系数; $S$ 是水库时段蒸发渗漏损失,为水库水面面积、蒸发能力和降

水量的函数。

5) 变量非负约束 由问题背景知,所有变量非负。

## 1.2 模拟模块

### 1.2.1 模拟规则

根据包含了防弃水线  $V_{qs}(t)$ 、防破坏线  $V_{ph}(t)$  和出力限制线  $V_{xz}(t)$  的水电站水库调度图的含义,并参考已有研究成果,以  $t$  时段为例说明模拟规则:设时段初始库容为  $V_B(t)$ 、时段平均入库流量为  $Q(t)$ ,假定时段末库容  $V_E(t)$  处在防破坏线  $V_{ph}(t)$  上,计算出力  $N_R$  (计算方法详见 1.2.2 节),根据  $N_R$  的数值大小进行如下判断:

1) 如果  $N_R < N_C$ ,说明时段末水位定得过高,发电流量太小,不足以发保证出力,应增加发电流量,加大发电出力;进而假定  $V_E(t)$  处在出力限制线  $V_{xz}(t)$  上,再求出力  $N_R$ 。进一步根据  $N_R$  的数值大小进行如下判断:

① 如果  $N_R \geq N_C$ ,说明时段末水位定得过低,放水流量过大,则本时段出力应等于  $N_C$ ,时段末库容应处在  $V_{ph}(t)$  和  $V_{xz}(t)$  之间。此时利用等出力法(计算方法详见 1.2.3 节),以  $N_R = N_C$  求时段末库容  $V_E(t)$ 。

② 如果  $N_R < N_C$ ,需要进一步判断: i. 如果  $N_R \geq \alpha \times N_C$  ( $\alpha \in (0.0, 1.0)$ , 本文取 0.5), 则  $N_R$  和末库容即为所求,即  $V_E(t) = V_{xz}(t)$ 。 ii. 如果  $N_R < \alpha \times N_C$ ,说明尚未满足降低出力值的要求,需继续降低库水位增加发电量。再令  $V_E(t) = V_D$ ,求发电出力  $N_R$ 。若  $N_R > \alpha \times N_C$ ,说明水库消落的过多,应以  $N_R = \alpha \times N_C$  发电,利用等出力法求时段末库容  $V_E(t)$ ;若  $N_R < \alpha \times N_C$ ,说明本时段来水量太枯,发电出力受到破坏,出力  $N_R$  为所求,时段末库容为  $V_E(t) = V_D$ 。

2) 如果  $N_C \leq N_R < (N_C + N_G)/2$ ,  $N_C$  为装机容量,则  $N_R$  值和时段末库容即为所求,即  $V_E(t) = V_{ph}(t)$ 。

3) 如果  $N_R \geq (N_C + N_G)/2$ ,说明时段来水较丰,应增加蓄水量。令  $V_E(t)$  处在防弃水线  $V_{qs}(t)$  上,求发电出力  $N_R$ ,进一步根据  $N_R$  的数值大小进行如下判断:

① 如果  $N_R < (N_C + N_G)/2$ ,表示蓄水过多,应以出力  $N_R = (N_C + N_G)/2$  发电,利用等出力法求时段末库容  $V_E(t)$ 。

② 如果  $(N_C + N_G)/2 \leq N_R \leq N_C$ ,则  $N_R$  和  $V_E(t)$  即为所求,即  $V_E(t) = V_{qs}(t)$ 。

③ 如果  $N_R > N_C$ ,表明本时段来水较丰,水库还需增加蓄水。令  $V_E(t) = V_U(t)$ ,求发电出力  $N_R$ ,进一步根据  $N_R$  的数值大小进行如下判断: i. 如果  $N_R > N_C$ ,表示时段来水量大,水库受上限水位的限制,不允许再增加蓄水,水库产生弃水,则计  $N_R = N_C$ ,  $V_E(t) = V_U(t)$ ; ii. 如果  $N_R < N_C$ ,表示水库蓄水过多,应按照  $N_R = N_C$  发电,利用等出力法求时段末库容  $V_E(t)$ 。

### 1.2.2 时段出力计算方法

通常有 2 种方法计算时段出力,一是公式法,如式(5)所示:

$$N_R = KQ_p H_p \quad (5)$$

式中,  $K$  为发电效率系数,  $Q_p$  为发电流量,  $H_p$  为发电水头。另一方法是基于机组耗水曲线  $N_R = N(Q_p, H_p)$  的查询法。电厂运行一段时间后,通常会对机组耗水曲线进行率定,因此机组耗水曲线查询方法更能反映电厂的实际运行状态。无论哪一种方法,都需要计算发电流量  $Q_p$  和时段平均水头  $H_p$ ,具体过程如下:

根据水量平衡,计算水库下泄流量:

$$Q_x + Q_i + \frac{V_1 - V_2 - S}{\Delta t} \quad (6)$$

发电流量:

$$Q_p = \min(Q_x, Q_G) \quad (7)$$

式中,  $Q_G$  为相应水位的水轮机过流能力。得到以上的发电流量  $Q_p$  (如果有弃水,将其加上) 和时段末库容  $V_2$  后,查算水库库容 ~ 水位关系曲线和坝下流量 ~ 水位转化关系曲线,得到发电水头:

$$H_p = f\left(\frac{V_1 + V_2}{2}\right) - g(Q_x) \quad (8)$$

式中,  $f(\ )$  和  $g(\ )$  分别为水库库容 ~ 水位和坝下流量 ~ 水位转化关系曲线函数。这样根据式(5)或机组耗水曲线查算,可得时段出力  $N_R$ 。

### 1.2.3 等出力法

等出力法计算时段发电流量和时段末水位,本质上是求解目标函数为最小化时段计算出力  $N_{com}$  与目标出力  $N_{obj}$  差值的优化问题,见式(9):

$$\begin{aligned} & \min | N_{obj} - N_{com} | \\ & \text{s. t.} \quad \begin{cases} V_2 = V_1 + (Q_i - Q_x)\Delta t - S; \\ Q_p = \min(Q_x, Q_G); \\ N_R = KQ_p H_p; \\ H_p = f\left(\frac{V_1 + V_2}{2}\right) - g(Q_x) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

以  $t$  时段为例说明具体计算步骤:① 假定发电流量

$Q_p'$ , 求时段末库容  $V_t = V_{t-1}(Q_i - Q_p')K_T$ ; ② 由查  $\frac{V_t + V_{t-1}}{2}$  库容曲线得时段水库平均水位  $Z_{u,t}$ , 由  $Q_p'$  查下游水位流量关系曲线得坝下水位  $Z_{d,t}$ ; ③ 计算  $N_{com}' = KQ_p'(Z_{u,t} - Z_{d,t})$  或  $N_{com}' = N(Q_p, Z_{u,t} - Z_{d,t})$ ; ④ 若  $|N_{com}' - N_{obj}| < \varepsilon$ , 转下一时段; 否则令  $Q_p' \leftarrow Q_p' - \frac{N_{com}' - N_{obj}}{K(Z_{u,t} - Z_{d,t})}$  或  $Q_p' \leftarrow Q_p' - [Q(N_{com}', Z_{u,t} - Z_{d,t}) - Q(N_{obj}, Z_{u,t} - Z_{d,t})]$  (注:  $Q(\ )$  为出力  $N$  和水头  $H$  求发电流量  $Q$  的表达形式), 转到步骤 ①。如此循环往复, 可得到满足精度要求的发电流量和时段末水库水位。

### 1.3 模型求解

HROO-SRGA 的模型求解包括资料输入、模拟优化、结果统计分析等 3 部分, 具体过程见图 1。

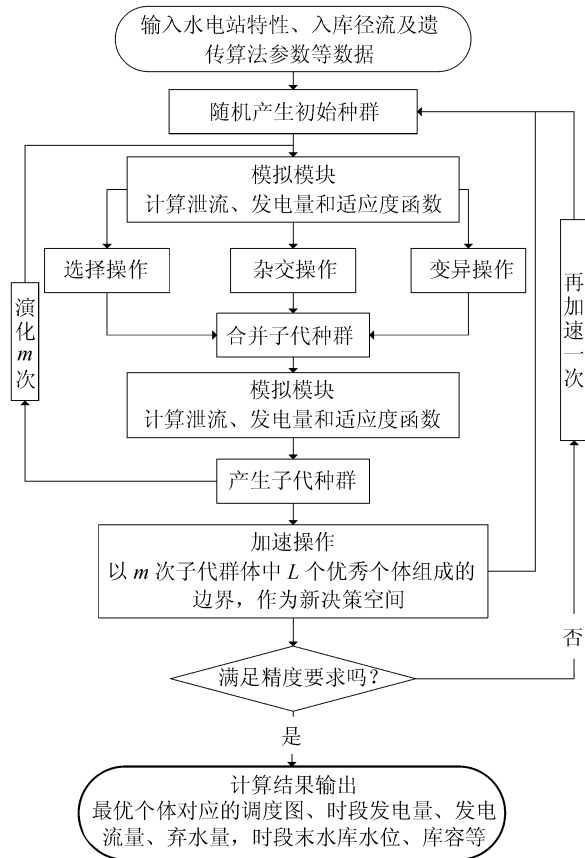


图 1 HROO-SRGA 计算框图

Fig. 1 Flowchart of HROO-SRGA

1) 资料输入。输入水库历年逐月坝址流量过程, 水库特征参数和水位~库容~面积关系, 坝下水位~流量关系, 水库泄流能力等曲线, 以及下游河道控制站点的生态环境需水过程; 水电站的装机容量, 保证出力及其目标保证率等; 输入加速遗传算法 (RAGA)<sup>[15]</sup> 计算参数: 群体规模  $N_{pop} = 300$ , 迭代次

数  $m = 2$ , 精英数目  $N_{opt} = 30$ 。

2) 模拟优化。① 在自变量允许变动范围内(死水位到正常高水位或汛限水位之间), 随机产生  $N_{pop}$  个染色体。② 判断产生的  $N_{pop}$  染色体是否满足约束条件式, 如果不满足则需进行调整。由模拟规则知, 模拟模块已把大部分约束条件处理了, 只剩下决策变量自身的约束式(2)。由于自变量是在允许范围内随机产生的, 并未考虑之间的大小关系, 因此存在染色体不满足式(2)的可能性, 这里采取的处理思路是: 把水库防弃水线、防破坏线和出力限制线对应的染色体转化为自变量, 等分为 3 段同时段按照从大到小进行排序。同时段的最大值赋给防弃水线, 其次赋给防破坏线, 最小的赋给出力限制线。这样经过位置调整后的染色体即为完全满足约束条件的  $N_{pop}$  个可行方案。这  $N_{pop}$  条染色体对应  $N_{pop}$  个可行的水库运行方案, 相当于  $N_{pop}$  幅水库调度图。③ 逐个模拟这  $N_{pop}$  幅可行的水库调度图, 根据式(1)计算相应的目标函数和适应度函数值<sup>[3,6,15]</sup>。④ 对上述的  $N_{pop}$  个染色体分别进行选择、变异和杂交操作, 构成  $3N_{pop}$  个染色体; 再对这  $3N_{pop}$  个染色体进行步骤 ② 和步骤 ③ 的操作, 从中优选出  $N_{pop}$  个作为子代群体, 并同时记录排在最前面的  $N_{pop}$  染色体, 作为精英保留下来。⑤ 把步骤 ④ 的  $N_{pop}$  个染色体替代 ① 随机产生的父代群体, 依次运行步骤 ② ~ 步骤 ④; 合并步骤 ④ 连续两次计算得到的  $N_{opt}$  染色体, 取对应变量的上下限作为优化变量的新搜索范围, 返回步骤 ①, 完成一次加速操作。如此循环反复, 直至满足程序结束条件转到 3)。步骤 ② ~ 步骤 ④ 是算法的核心部分, 称为演化迭代; 步骤 ⑤ 旨在通过压缩优化变量的搜索空间, 提高寻优速度, 通常称为加速操作。如此, 在目标函数控制下, 对模拟模型进行优选计算, 直至最终收敛于最优调度线, 自动优选出水库发电优化调度图。

3) 计算结果统计。输出的计算结果包括水库发电调度图, 时段水库入库流量、发电量、水库水位、弃水量, 以及保证出力保证率、总发电量、总弃水量等统计参数。

## 2 实例应用

本研究以某水电站枢纽工程为例说明 HROO-SRGA 的使用过程。该水电站是某流域重要的防洪控制性工程, 兼有发电、防洪、灌溉、养殖、旅游等综合效益, 控制流域面积  $5\ 758\ \text{km}^2$ , 坝址处多年平均径流量为  $62.8 \times 10^8\ \text{m}^3$ , 水库总库容  $12.17 \times 10^8$

$\text{m}^3$ ,坝顶高程 875 m (黄海基面),最大坝高 110 m。水库正常蓄水位 872 m,死水位 845 m。装机容量为 240 MW,保证出力 68.5 MW,设计保证出力保证率为 90%。6月1日至11月15日为汛期,其中6月1日~8月31日为主汛期,汛限水位为 870.5 m;9月1日~11月15日为后汛期,可以超过限制水位蓄洪,直至汛末蓄到 872.0 m。此外,由于该水库建在跨界河流上,经综合协商确定下泄流量不少于  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  作为下游生态和经济社会用水限制。

机组耗水曲线即机组的出力 ( $N$ ) 发电流量 ( $Q$ ) 水头 ( $H$ ) 的关系曲线。通常情况下电厂运行一段时间后,都要对其进行率定,以反映电厂最新的运行特性,因此,机组耗水曲线是综合考虑多方面因素而得出的发电出力查算曲线,较之式(5)更为合理。但由于水电站运行时间较短(2011年6月投产),目前尚未获得率定好的机组耗水曲线,本研究依据电厂提供的单机耗水曲线(如图2所示),并考虑厂内经济运行等情况,经与电厂运行管理专家多次讨论分析,确定了以水头为参变量的机组耗水曲线,如图3所示。

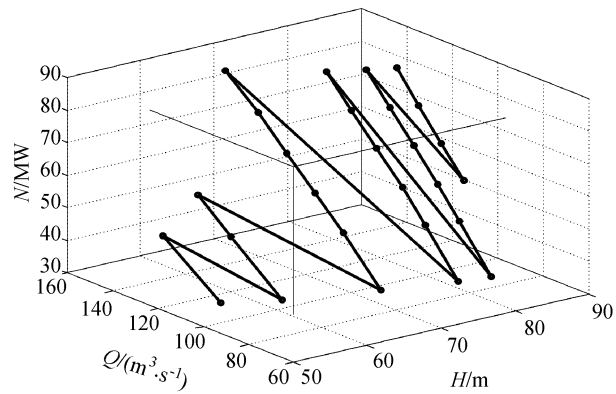


图2 3维空间中单机耗水曲线

Fig. 2 Efficiency curve of one hydropower unit in 3D space

由图3可以看出,以水头为参变量的机组曲线向左下方延长时,不能通过坐标原点,因此机组存在空耗流量。考虑到以时段平均泄量插值计算求出力,当时段平均泄量低于空耗流量时,仍可以把水集中于较短的时间内用于发电,那么时段出力并不是零。因此,当泄量小于空耗流量时,在空耗流量和零流量之间进行线性插,计算时段出力,相当于将图3中的曲线进行修改,使之通过原点。

本次收集了1960年6月—2002年5月的历年逐月坝址径流资料。按照 HROO-SRGA 计算流程,把水库水位~流量关系、坝下水位流量关系等水电

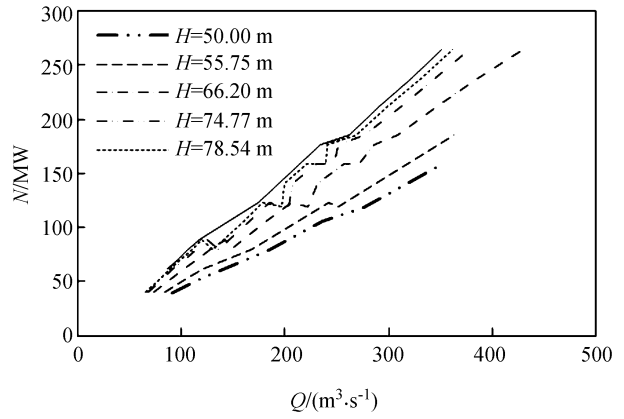


图3 以水头为参变量机组曲线

Fig. 3 Efficiency curves of all hydropower units water head as parameters

站水库特征参数,以及长系列入库径流资料等输入到 HROO-SRGA。RAGA 加速运行 5 次时计算结果趋于稳定,此时所有个体(可行方案)对应的多年平均发电量和保证出力保证率如图4所示。

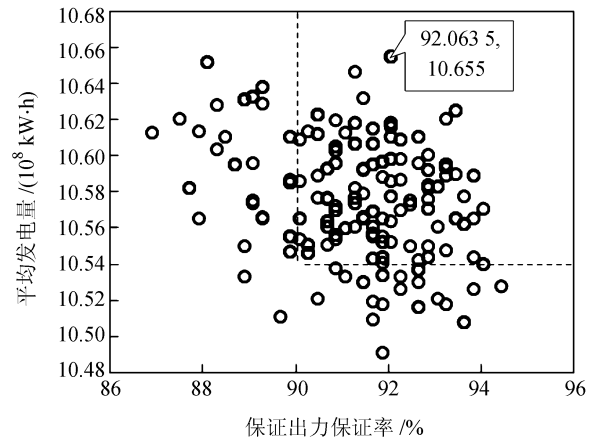


图4 水库保证出力保证率与年均发电量的关系

Fig. 4 Guaranteed rate of guaranteed output vs power generation

由图4可以看出,图中右上角部分的所有方案,都优于常规调度图所具有的保证出力保证率 90% 和年均发电量  $10.53 \times 10^8 \text{ m}^3$  的调度计算结果。这是 HROO-SRGA 方法较之常规方法的优势之一,它能给出多个(而不是1个)可行方案供决策者选择。本文选择保证出力保证率为 92.06% 和年均发电量为  $10.655 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$  的这个方案作为选择方案,其调度图如图5所示。

根据本文建立的水电站水库运行模拟规则(1.2节),把1960年6月—2002年5月的坝址历年逐月径流资料代入常规调度图进行长系列模拟计算,得出多年平均发电量为  $10.53 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,保证出力 68.5 MW 的保证率为 89.93%,弃水量为

$125.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与本文提出的优化调度图的计算结果对比如表 1 所示。

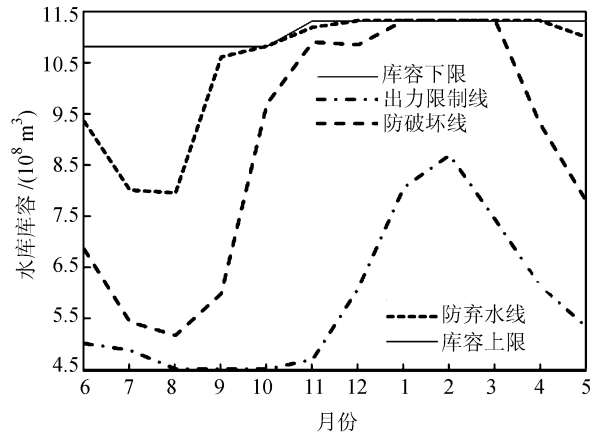


图 5 水库优化发电调度图

Fig. 5 Reservoir optimal operation rules

表 1 优化调度图与常规调度图参数对比

Tab. 1 Simulating results between optimal operation rules and conventional operation rules

调度图	来水量/ $10^8 \text{ m}^3$	弃水量/ $10^8 \text{ m}^3$	发电量/ $(10^8 \text{ kW} \cdot \text{h})$	保证出力 保证率/%
优化调度图(图 5)	2 656.18	123.27	10.655	92.06
常规调度图(图 6)	2 656.18	125.54	10.529	89.93

从表 1 可以看出,本文提出的优化调度图,较之常规调度图(图 6),在保证出力保证率更大的情况下,平均每年增发电量  $0.126 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 增加幅度为 1.2%。图 7 是本文提出的优化调度图的水库泄量,从图 7 可看出水库泄量均大于  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , 完全满足下游生态流量需求。

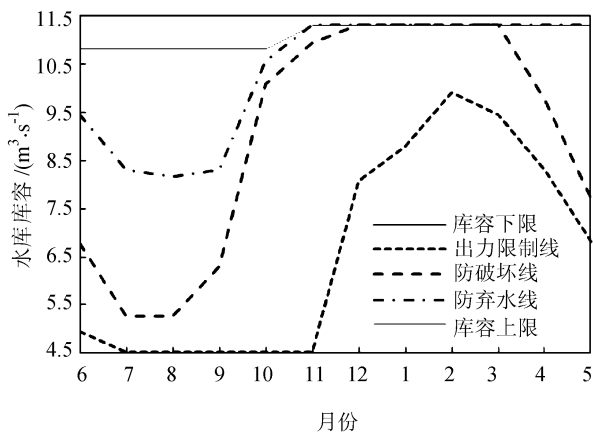


图 6 水库常规发电调度图

Fig. 6 Reservoir conventional operation rules

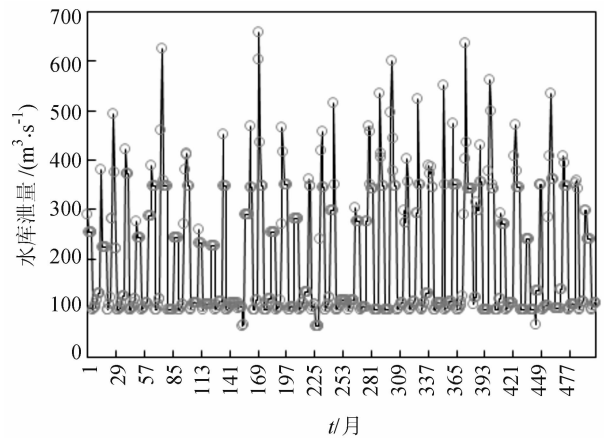


图 7 优化调度情景下水库泄流

Fig. 7 Reservoir release under optimal operation rules

由以上建模和使用过程可知,与常规方法相比 HROO-SRGA 具有如下优点:

1) HROO-SRGA 是一种把调度图“绘制”和“有效性检验”结合起来的方法,得到的程度图无需进一步验证,并且能够给出多个可行方案,为水库管理者选择更为符合实际、更优的水库调度图提供了条件。

2) HROO-SRGA 中的“模拟规则”是比较灵活的,它可以融入决策者和管理者的经验和具体调度要求,为获得更加符合调度实际的水库发电调度模型和调度图提供了可能。

3) HROO-SRGA 的建立过程,特别是“模拟模块”,其调节计算过程与实际调度决策过程类似,更便于人们直观理解。

### 3 结 论

通过构造水库发电调度模拟规则与保证出力设计保证率满足前提下最大化发电量的目标函数,并借助遗传算法并行计算能力,把调度图的“绘制”和“有效性检验”结合起来,建立了基于遗传模拟的水库发电优化调度模型 HROO-SRGA,详细阐述了 HROO-SRGA 的建模步骤及其调度图绘制方法,编制了较为通用的计算机程序,并进行了实例应用,得出如下结论:

1) HROO-SRGA 具有概念清晰、可灵活融合水库管理经验,考虑下游河道生态需水等复杂约束等优点,调度图更符合实际。

2) HROO-SRGA 把调度图的绘制与有效性检验结合起来,得出的调度图无需再检验,较常规方法更为快速高效。

3) HROO-SRGA 利用了遗传算法的并行计算能

力,可快速获得满足保证出力要求的多组优化调度方案(调度图),决策信息更加丰富。

4)建立 HROO-SRGA 过程中,所形成的“模拟规则”与“遗传算法”相结合的建模思路,可方便地推广到供水、防洪等其他类型的水库管理或水资源系统中。即只要建立了水库或水资源管理系统的模拟模型(模拟模型往往具有吸收约束条件、保证方案可行的优势),便可以与遗传算法或其它具有并行计算功能的智能计算方法相结合,建立模拟规则与智能优化相结合的模型,快速获得多组可行方案。

#### 参考文献:

- [1] Pen Tao, Wei Chengzhi, Ye Jintao, et al. Hydrometeorology forecast system of the danjiangkou basins in hanjiang[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(1): 112 - 119. [彭涛, 位承志, 叶金桃. 汉江丹江口流域水文气象预报系统[J]. 应用气象学报, 2014, 25(1): 112 - 119.]
- [2] Tan Weiyang, Huang Shouxin, Liu Jianmin, et al. Application of dynamic programming in optimizing the regulation of reservoirs of hydroelectric stations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982, 13(7): 1 - 7. [谭维炎, 黄守信, 刘建民, 等. 应用随机动态规划进行水电站水库的最优调度[J]. 水利学报, 1982, 13(7): 1 - 7.]
- [3] Wang Zongzhi, Cheng Liang, Wang Yintang, et al. A multi-reservoir ecological operation model based on subdivision application of reservoir storage capacities [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 435 - 443. [王宗志, 程亮, 王银堂, 等. 基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 435 - 443.]
- [4] Wang Jing, Yan Shang, Chen Shijun, et al. Flood control optimal operation on cascade reservoirs of downstream Yalong river considering actual running of floodgate [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(4): 20 - 25. [王靖, 鄢尚, 陈仕军, 等. 考虑闸门实际运行的雅砻江下游梯级水库联合防洪优化调度[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(4): 20 - 25.]
- [5] Yanlai Zhou, Shenglian Guo. Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaption to climate change [J]. Journal of Hydrology, 2013, 498: 153 - 164.
- [6] Wang Zongzhi, Wang Yintang, Chen Yiwei, et al. Multi-objective reservoir regulation model based on simulation rules and intelligent optimization and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 564 - 571. [王宗志, 王银堂, 陈艺伟, 等. 基于仿真规则与智能优化的水库多目标调控模型及其应用[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 564 - 571.]
- [7] Sigvaldason O T. A simulation model for operating a multipurpose multi reservoir system [J]. Water Resources Research, 1976, 12(2): 263 - 278.
- [8] Yin Zhengjie, Hu Tiesong, Wu Yunqing. Deriving multipurpose reservoir operating rule curves using multi-objective genetic algorithms [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 40 - 44. [尹正杰, 胡铁松, 吴运卿. 基于多目标遗传算法的综合利用水库优化调度图求解[J]. 武汉大学学报, 2005, 38(6): 40 - 44.]
- [9] Madani K, Lund J R. Modeling California's high-elevation hydropower systems in energy units [J]. Water Resources Research, 2009, 45, W09413. doi:10.1029/2008WR007206.
- [10] Little J D C. The use of storage water in a hydroelectric system [J]. Journal of the Operations Research Society of America, 1955, 3(2): 187 - 197.
- [11] Kelman J, Stedinger J R. Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation [J]. Water Resources Research, 1990, 26(3): 447 - 454.
- [12] Yin Xin'an, Yang Zhifeng, Petts G E. Reservoir operating rules to sustain environmental flows in regulated rivers [J]. Water Resources Research, 2011, 47, W08509. doi: 10.1029/2010WR009991.
- [13] Jiing Yunyou, Ximing Cai. Hedging rule for reservoir operations: 2. A numerical model [J]. Water Resources Research, 2008, 44, W01416. doi:10.1029/2006WR005482.
- [14] Fi-John Chang, Li Chen, Chang Lichiu. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithm [J]. Hydrological Process, 2005, 19: 2277 - 2289. doi: 10.1002/hyp.5674.
- [15] Jin Juliang, Yang Xiaohua, Ding Jing. An improved simple genetic algorithm—Accelerating genetic algorithm [J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2001, 21(4): 8 - 13. [金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 8 - 13.]
- [16] Yang Xiaohua, Di Chongli, Mei Ying, et al. Refined gray-encoded evolution algorithm for parameter optimization in convection-diffusion equations [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2014, 24(6): 1275 - 1289.