

基于改进与优化调度图的梯级电站联合调度

徐 刚^{1,2}, 夏 甜¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:针对水库调度图常规制作方法的不足,按照梯级电站联合调度的要求,运用基于确定性优化调度模型的水库调度图改进和优化制作方法,结合水库调度函数进行梯级电站水库联合调度;以杂谷脑流域梯级电站水库联合调度为例,绘制了杂谷脑梯级电站中狮子坪电站的水库调度图,制定了薛城和古城电站水库运行策略,形成了杂谷脑流域梯级电站联合调度的决策方案。结果表明:用改进与优化制作方法绘制的水库调度图,满足了降低出力的要求,协调了不同的调度区域,提高了水库调度图的保证率、实用性和经济性;采用改进与优化调度图结合水库调度函数的调度方式,能形成有效的梯级电站联合调度决策方案,提高了梯级电站的联合调度发电量。

关键词:梯级电站;联合调度;水库调度图;水库调度函数;确定性优化调度

中图分类号:TV697.1⁺² **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0044-06

Joint dispatching of cascade hydropower station based on improved and optimized reservoir operation chart//XU Gang^{1,2}, XIA Tian¹ (1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: There are some deficiencies in the conventional methods of making reservoir operation chart. According to the requirements of joint dispatching of cascade hydropower station, joint dispatching of cascade hydropower station was proposed by means of improved and optimized reservoir operation chart, which was based on optimized deterministic dispatching model, combined with reservoir operation function. Taking the joint dispatching of cascade hydropower station in Zagunao River basin as an example, the reservoir operation chart of Shiziping hydropower station in Zagunao cascade hydropower station was made. Additionally, the reservoir operation strategies of Xuecheng and Gucheng hydropower station were developed, and the decision scheme of the joint dispatching of cascade hydropower station in Zagunao River Basin was formed. The results show that the improved and optimized reservoir operation chart can meet the requirements of lesser output, can coordinate the different scheduling region, and improve the guarantee rate, the practicability and economy of the reservoir operation chart. With the scheduling method of improved and optimized reservoir operation chart combined with the reservoir operation function, an effective decision scheme of joint dispatching of cascade hydropower stations was formed, raising the energy output of cascade hydropower stations.

Key words: cascade hydropower station; joint dispatching; reservoir operation chart; reservoir operation function; optimized deterministic dispatching

我国在长江流域、黄河流域和各大中小型流域相继形成了梯级开发的模式。流域梯级电站以及跨流域梯级电站集中向电网供电是未来流域梯级电站联合调度的发展趋势。国内水库调度图常采用常规制作方法,即以典型年径流作为入流,进行等流量或等出力模拟调度^[1],取历年蓄水指示线包络线作为调度线。王平^[2]根据前人的研究经验,指出了水库发电调度图常规制作方法存在的问题,并提出了改进方法,采用长系列时历法计算降低出力线,优先满足水电站降低出力的要求,然后从降低出力线至正常蓄水位之间的区域中划分出保证出力区和加大出力区,协调了水库调度图的各个调度区。Xie 等^[3]基于求解得出的大量确定性优化调度结果分析得出发电调度规则,模拟调度结果满足经济效益高的要求。随着动态规划法、非线性规划法以及智能算法在水库优化调度中的应用,采用等出力或等流量径

流调节计算方法进行水库径流调节显得过于保守,浪费了一些本可以利用的水资源。另外由于代表年的代表性不足,采用常规制作方法编制的水库调度图,不能保证准确满足设计保证率以及枯水期降低出力要求,需要采用长系列资料进行反复检验和修正,而这种修正也是经验性的,并没有准确、快捷的求解方法。

为了改善水库调度图常规制作方法,更好地运用水库调度图指导梯级电站水库联合调度,本文基于确定性优化调度模型的水库调度图改进与优化制作方法制作水库调度图,在此基础上综合运用水库常规调度图、水库调度函数等水库调度规则进行梯级电站水库联合调度,并以岷江杂谷脑流域梯级电站联合调度为实例对本文所提出的方法进行验证。

1 梯级电站水库联合调度

1.1 确定性优化调度模型

1.1.1 目标函数

假定水库以发电功能为主,此时优化目标为最大化发电量,即

$$E = \max \sum_{t=1}^T A Q_t H_t \Delta t \quad (1)$$

式中: E 为发电量; T 为计算期的总时数; A 为出力系数; Q_t 为第 t 时段电站引用流量; H_t 为第 t 时段平均水头; Δt 为计算时段长。

1.1.2 约束条件

水库的水量平衡约束、水库的蓄水量约束、电站引用流量约束、电站出力约束分别为

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t - S_t) \Delta t \quad (2)$$

$$V_{t,\min} \leq V_t \leq V_{t,\max} \quad (3)$$

$$Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\max} \quad (4)$$

$$N_{\min} \leq A Q_t H_t \leq N_{\max} \quad (5)$$

式中: V_t 、 V_{t+1} 分别为水库第 t 时段初、末的蓄水量; I_t 为第 t 时段水库入库流量; S_t 为第 t 时段弃水流量; $V_{t,\min}$ 为水库发电允许的最少蓄水量,一般对应死库容; $V_{t,\max}$ 为水库发电允许的最大蓄水量,一般为汛限水位或正常蓄水位对应的蓄水量; $Q_{t,\min}$ 为发电机组过机流量下限值; $Q_{t,\max}$ 为发电机组过机流量上限值; $N_{\min}$ 为水电站出力下限值; $N_{\max}$ 为水电站出力上限值,可综合考虑机组额定出力及调峰要求等确定。另外,以上所有变量都必须满足非负约束。

1.1.3 优化算法

水库优化调度中的优化算法有很多,主要以动态规划法^[4]、POA 逐次逼近算法^[5-6]、GA 遗传算法^[7-8]和模拟群集智能搜索算法^[9-10]为代表。下面以模糊群集智能搜索算法中的蚁群算法^[11]为例,介绍

模拟群集智能搜索算法在水库优化调度中的应用。

a. 设置蚁群算法参数:种群大小 M 、最大进化代数 T 、信息素挥发参数 ρ ($0 < \rho < 1$)、信息启发式因子 α 、期望值启发式因子、信息素痕迹初值 τ_0 、阈值参数 q_0 ($0 \leq q_0 \leq 1$)。

b. 初始蚁群:随机生成 m 只人工蚂蚁及路径,并将路径添加到路径集合 S 中,初始化 $\tau_i = \tau_0$ ($i = 1, 2, \dots, m$), τ_i 代表路径上的累积信息素。

c. 构建路径:先对每只蚂蚁根据状态转移规则选择新路径,然后在 $[0, 1]$ 区间中产生随机数 q ,再将 q 与 q_0 进行比较,当 $q \leq q_0$ 时,对人工蚂蚁所在的路径 S_{old} 随机地进行变异,即对水库水位离散序列 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_T\}$ 中的 z_i 在搜索空间限定范围内随机地进行变异操作;当 $q > q_0$ 时,依据高概率原则在路径集合 S 中选择路径 s ,其中概率 P 按式(6)计算:

$$P = \begin{cases} \frac{\tau_i^\alpha \eta_{is}^\beta}{\sum_{s \in S} \tau_s^\alpha \eta_{is}^\beta} & s \in S \\ 0 & s \notin S \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\eta_{is} = E_i - E_s$ ($i, s \in S$)

式中: τ_i 、 τ_s 分别为路径 i 、 s 相关的信息素痕迹; E_i 、 E_s 分别为路径 i 、 s 的目标函数值(发电量); η_{is} 为用于评价蚂蚁从路径 i 向路径 s 转移的局部启发函数。

d. 更新信息素:计算各蚂蚁当前路径 i 的目标函数值 E_i ($i = 1, 2, \dots, m$)。对当前路径集合 S 按式(7)更新信息素痕迹:

$$\tau_i = (1 - \rho) \tau_i + \rho \Delta \tau_i \quad (i \in S) \quad (7)$$

若路径 i 为当前最优路径,则 $\Delta \tau_i = \frac{E_i}{C}$, E_i 为当前最优解, C 为正常数。

e. 判断是否满足迭代终止条件和达到最大迭代次数。若是,则结束迭代,输出结果;否则返回构建路径步骤,重新进行迭代计算。

1.2 水库调度图改进与优化制作方法

1.2.1 水库调度图改进与优化原则和思路

针对水库调度图常规制作方法的不足,对常规制作方法进行的改进与优化遵循以下原则和思路:

a. 采用长系列时历法计算。由于常规方法计算的调度图不能保证完全满足设计保证率的要求,现有规范均要求再用长系列资料进行检验和修正,所以改进方法应直接采用长系列时历资料计算调度图,以协调径流调节和水库调度两阶段计算成果。

b. 采用上文描述的确定性优化调度模型进行径流调节计算。随着优化算法的大规模运用,如仍

然采用常规方法求解历年的水库水位蓄水指示线,不符合水电站经济运行要求。

c. 协调水库不同调度区的关系。首先确定调度图降低出力和降低出力限制线,优先满足降低出力时不会发生破坏,在降低出力线以上确定保证出力区和出力防破坏线,最后在出力防破坏线以上确定不同的加大出力线和加大出力区。

d. 不同调节性能水库采用统一的计算方法。针对具有不完全年调节能力以上调节能力的水库,采用统一的计算方法。

e. 水库调度图改进与优化制作方法以计算机为工具。改进计算方法将采用计算机实现自动计算,方便地试算出合适的保证出力值、出力保证率、降低出力值和加大出力值。

1.2.2 水库调度图改进与优化制作步骤

步骤1 求解降低出力和降低出力限制线。选取长系列中的枯水年,通过试算确定枯水期的降低出力,当降低出力小到一定程度时,枯水期各时段出力均不被破坏,取此时水库蓄水指示线上包络线作为枯水期降低出力限制线。

步骤2 求解保证出力和保证出力区。选取长系列中的平水年,通过试算求解设定的保证率对应的出力作为保证出力,取历年正常出力时段的水库蓄水指示线下包络线作为正常出力时段的降低出力限制线,正常出力时段的降低出力限制线至水库正常蓄水位之间的区域作为可以发出不少于保证出力的区域。以正常出力时段降低出力限制线至第1根加大出力线之间的区域作为保证出力区,第1根加大出力线也是出力防破坏线。

步骤3 求解加大出力和加大出力区。当水库有加大出力需求时,需从可以发出不少于保证出力的区域中分解出不同的加大出力区。选取长系列中的丰水年作为入流资料,设置加大出力值,取历年同期水库蓄水指示线下包络线作为加大出力线,加大出力线以上区域为加大出力区。预想出力线为预想出力情况下历年水库蓄水指示线下包络线,预想出力线以上、正常蓄水位以下的区域为预想出力区。

步骤4 调度线修正。为避免调度线交叉,应确保加大出力线在降低出力线之上。

1.3 梯级电站水库调度规则的综合运用

通常在流域梯级电站中,梯级电站龙头水库的调节能力较强,整个梯级电站的总出力与龙头水库的调蓄状态相关性较强,而下游电站调节能力一般较弱,有些甚至只具有日调节能力,其水位在长时间内变化不大,绘制水位-出力调度图有所不便,同时下游电站出力和上游梯级电站出力有关,可以采用

调度函数^[12-13]作为下游电站决策方案。因此,将流域中龙头电站的出力决策作为流域梯级电站联合调度的核心决策,下游电站出力决策作为核心决策的分解决策。流域梯级电站联合调度决策方案包括龙头电站调度图和下游电站调度函数,不同决策方案的计算流程如图1所示。

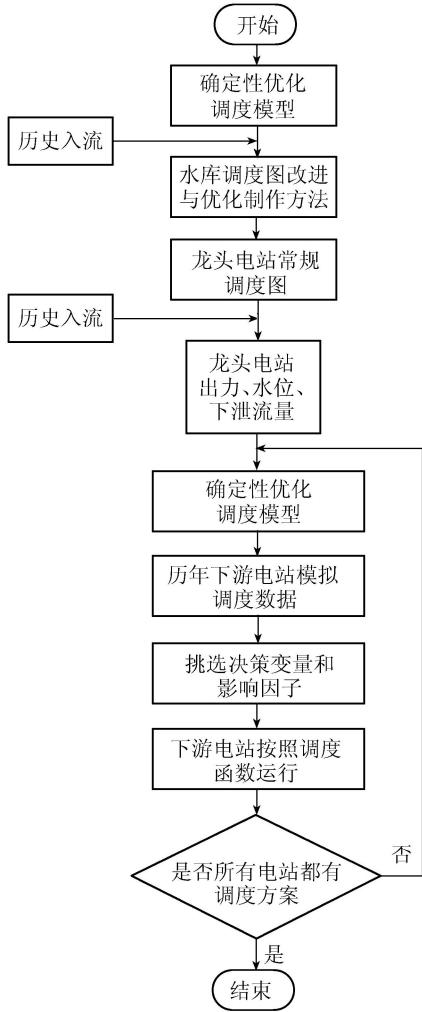


图1 流域梯级电站联合调度不同决策方案计算流程

2 杂谷脑流域梯级电站联合调度实例

杂谷脑流域狮子坪、薛城和古城3个梯级电站采取联合调度方式进行集中控制调度。狮子坪电站为杂谷脑河干流的龙头水库电站,电站装机容量195 MW,水库正常蓄水位2540.0 m,死水位2460.0 m,调节库容1.189亿m³,具有年调节能力。薛城电站装机容量138 MW,水库正常蓄水位1709.5 m,相应库容114.8万m³,汛期排沙运行水位1704.0 m,水库死水位1704.0 m,调节库容62.3万m³,具有日调节能力。古城电站装机容量168 MW,水库正常蓄水位1554.5 m,相应库容93.9万m³,汛期排沙运行水位1550.0 m,水库死水位1550.0 m,调节库容58万m³,具有日调节能力。

2.1 狮子坪电站水库常规调度图的改进与优化

遵循水库调度图改进与优化原则和思路,利用水库调度图改进与优化制作方法绘制狮子坪电站水库调度图。该方法采用 C# 计算机程序实现,基于 Visual Studio 2005 平台,采用语言编程环境开发出基于蚁群算法的水库优化调度模型作为程序径流调节计算模块,优化调度模块的输入为长系列径流资料,输出为水库历年蓄水过程线,再取相应的蓄水指示线包络线作为调度线。狮子坪电站水库调度图改进与优化制作方法的具体步骤如下:

2.1.1 求解降低出力和降低出力限制线

选取长系列中经验频率大于 70% 的枯水年作为入流,初定 1—4 月最小出力下限值为 60 MW, 11—12 月为 80 MW,汛期不设最小值,通过不断调整枯水期时段的最小出力下限值,试算出枯水期时段的降低出力,这一降低出力应能使长系列的各枯水期时段都能满足最小出力而不被破坏。当 1—4 月降低出力为 35 MW、11—12 月降低出力为 50 MW 时,长系列资料中所有年份枯水期时段出力全部不被破坏,试算结束。取整个长系列径流调节过程的枯水期时段蓄水指示线的上包络线作为对应的降低出力限制线,在该指示线以上可以发大于降低出力的出力,指示线以下必须发小于降低出力的出力。枯水期时段降低出力限制线和死水位之间的区域为降低出力区。

2.1.2 求解保证出力和保证出力区

选取长系列中经验频率在 30% ~ 70% 之间的平水年作为入流,根据已经确定的降低出力,把相应破坏时段的最小出力下限值分别设定为各自的降低出力,其他正常出力时段的最小出力下限值设置为 195 MW,也就是满发,利用上文介绍的优化调度模

型进行长系列径流调节计算,通过不断调整最小出力下限值,保证率也会相应增大,当出力下限值设置为 120 MW 时,保证率可以达到 82.8%。取试算的长系列所有年份蓄水过程线对应的水库蓄水指示线下包络线作为正常出力时期降低出力限制线。以正常出力时期降低出力限制线至第 1 根加大出力线之间的区域作为保证出力区。

2.1.3 求解加大出力线和加大出力区

选取长系列中经验频率小于 30% 的丰水年作为入流,狮子坪电站最有可能加大出力的时段为 5—8 月,利用优化调度模型进行径流调节计算,设定丰水期时段的出力下限值为已经确定的降低出力,正常时段 5—8 月出力下限值设置为 195 MW,经过试算正常工作时段电站出力为 195 MW 时不会造成破坏,取该径流调节过程的所有蓄水指示线下包络线作为加大出力线。分别设置加大出力值为 195 MW、170 MW 和 145 MW,绘制出相应的加大出力线。不同的加大出力线之间的区域分别对应不同的加大出力区,其中 195 MW 加大出力区为预想出力区。

2.1.4 调度线的修正

若调度线上个别点造成调度线交叉,利用计算机对该点进行修正,确保调度线不交叉。利用水库调度图改进与优化制作方法绘制的狮子坪电站水库调度图如图 2 所示。

2.2 薛城和古城电站水库运行策略的拟定

根据水库调度图改进与优化制作方法,计算出狮子坪电站水库调度图,形成杂谷脑梯级电站联合调度决策方案中的核心决策。将历年来水作为输入,以狮子坪电站水库调度图作为调度规则进行模拟调度,求解狮子坪电站 1977—2005 年的调度过程。通过分析狮子坪电站 29 年的模拟调度数据,采

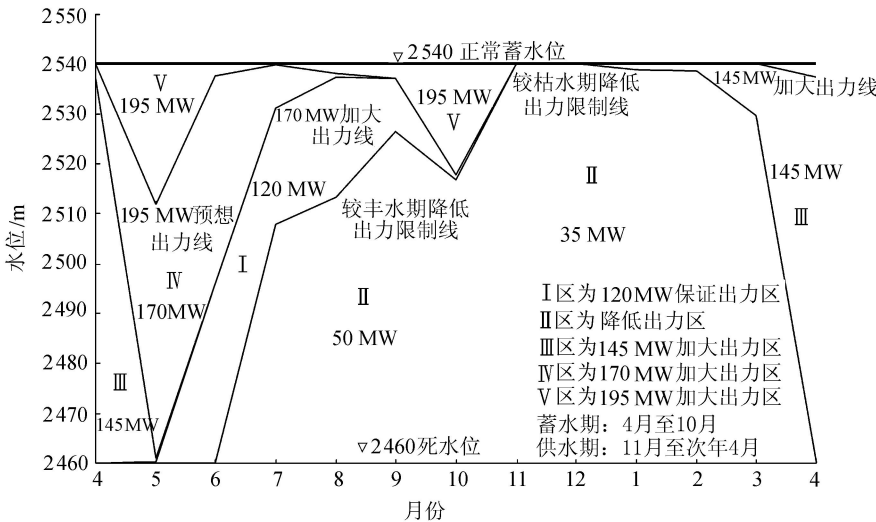


图2 狮子坪电站水库调度图

用多元回归分析分别确定薛城电站和古城电站与狮子坪电站出力和天然来水之间逐月的相关关系,形成了薛城电站和古城电站的水库调度函数,即杂谷脑梯级电站中的分解决策一和分解决策二。薛城电站和古城电站调度函数分别为

$$N_{xc} = aQ_t + bN_{szp} + c \tag{8}$$

$$N_{gc} = aQ_t + bN_{szp} + c \tag{9}$$

式中: a 、 b 、 c 为参数,其值见表 1; N_{xc} 为薛城电站出力; N_{gc} 为古城电站出力; N_{szp} 为狮子坪电站出力; Q_t 为天然来水流量。

表 1 薛城和古城电站调度函数参数的取值及复相关系数

月份	薛城电站				古城电站			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
1	1238.58	0.04	0	0.991	1148.57	0.04	0	0.991
2	-69.38	0.38	-5.95	1	-62.69	0.35	-6.62	1
3	32.59	0.37	-45.30	0.999	33.10	0.35	-44.25	0.999
4	74.78	0.37	759.86	0.983	71.68	0.34	696.00	0.983
5	637.01	0.27	265.79	0.928	732.30	0.22	334.27	0.932
6	681.04	0.20	2112.22	0.949	778.33	0.13	2706.96	0.926
7	626.42	0.29	-564.56	0.806	757.79	0.20	818.30	0.915
8	783.77	0.22	618.89	0.954	931.18	0.14	898.24	0.968
9	800.14	0.20	650.36	0.952	942.25	0.12	1141.44	0.972
10	686.36	0.23	673.54	0.939	637.13	0.21	630.07	0.939
11	-39.03	0.39	-134.07	0.996	-35.96	0.36	-121.82	0.996
12	-40.28	0.41	-14.22	0.585	-39.99	0.38	-13.25	0.576

2.3 杂谷脑流域梯级电站联合调度方案的检验

2.3.1 狮子坪电站调度图检验

以全部历史来水系列作为输入,以调度图作为调度规则,逐年计算出狮子坪电站水库的蓄泄过程、出力过程等,计算出水库按照调度图运行所具有的保证率。狮子坪电站除了最大限度地满足较枯水期破坏时段的出力外,正常工作时段平均出力均大于 120 MW。因此狮子坪电站按照改进与优化制作方法绘制水库调度图是合理可行的。

2.3.2 薛城和古城电站调度函数的检验

在对变量进行线性回归分析时,采用最小二乘法进行参数估计,复相关系数 R^2 为回归平方和与总离差平方和的比值, R^2 越大,模型越精确,回归效果越显著。拟合了薛城和古城电站水库调度函数,通过计算各函数的 R^2 来检验函数的拟合效率, R^2 计算结果如表 1 所示,可见大部分月份的 R^2 值都在 0.9 以上,由于 12 月处于丰枯衔接时段,来水偶然性较大,导致线性相关性不如其他月份显著。对 R^2 进行 F 检验,计算公式如下:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - k - 1}{k} \tag{10}$$

式中: n 为样本数目; k 为自变量维度。

计算得出 $F = 6.45$,通过查询 F 分布表^[14]得知

$F_{0.01} = 5.53, F > F_{0.01}$ 表明复相关关系在置信度水平 $\alpha = 0.01$ 上显著,因而本例中调度函数的拟和效果较好。

2.3.3 杂谷脑梯级电站水库联合调度方案及其检验

通过将杂谷脑流域梯级电站联合调度决策方案分解为狮子坪电站水库调度图、薛城和古城电站调度函数,可以实现梯级电站联合调度。根据狮子坪电站水库调度图当前时段初的出力,求解狮子坪下泄流量,利用薛城、古城电站调度函数计算薛城电站和古城电站的发电出力,计算狮子坪、薛城和古城 3 个电站出力总和。

分别计算了优化调度、改进与优化调度图(采用改进与优化制作方法绘制的水库调度图)结合调度函数以及常规调度图结合调度函数 3 种梯级电站联合调度方式的梯级电站多年平均发电量,计算结果分别为 21.124 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、20.451 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 17.632 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。结果表明:改进与优化调度图结合调度函数方式的梯级电站多年平均发电量只比优化调度方式的发电量降低了 3.3%,比常规调度图结合调度函数方式提高了 16.0%;改进与优化方法绘制的水库调度图结合调度函数方式在保证狮子坪电站水库调度图设计保证率较高的同时,还显著增加了梯级电站的多年平均发电量。

3 结 语

针对水库调度图常规制作方法的不足,用长系列法替代典型年法,按照先满足破坏时段降低出力的要求绘制降低出力线,后绘制出力防破坏线和加大出力线的方式,协调了水库调度图的不同调度区,满足了降低出力的要求,提高了水库调度图的保证率和实用性;基于水库确定性优化调度模型的径流调节,优化了水库调度方式。采用改进与优化调度图结合调度函数的梯级电站联合调度方式,在提高调度图保证率的同时,也增加了梯级电站联合调度的多年平均发电量。

参考文献:

[1] 张秀菊. 水电站保证出力的计算方法[J]. 水力发电, 2006, 32 (10): 21-23. (ZHANG Xiuju. Calculation method of firm output of hydropower station [J]. Water Power, 2006, 32 (10): 21-23. (in Chinese))
[2] 王平. 水库发电调度图常规计算方法的问题和改进建议[J]. 水利水电工程设计, 2007, 26 (3): 26-29. (WANG Ping. The problems and the improving suggestions for conventional calculation method of power generation dispatching drawings of reservoir [J]. Design of

- Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2007, 26 (3):26-29. (in Chinese))
- [3] XIE Wei, JI Changming, YANG Zijun, et al. Short-term power generation scheduling rules for cascade hydropower stations based on hybrid algorithm[J]. Water Science and Engineering, 2012, 5(1):46-58.
- [4] 路志宏,魏守平. 变状态空间动态规划法在水库优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(2):55-57. (LU Zhihong, WEI Shouping. Status variable space dynamic programming and its application for optimal operation of cascaded hydroelectric systems[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(2):55-57. (in Chinese))
- [5] 宗航,李承军,周建中,等. POA 算法在梯级水电站短期优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(1):46-48. (ZONG Hang, LI Chengjun, ZHOU Jiangzhong, et al. Research and application for short-term cascaded hydroelectric scheduling based on progressive optimality algorithm[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(1):46-48. (in Chinese))
- [6] 周佳,马光文,张志刚. 基于改进 POA 算法的雅砻江梯级水电站群中长期优化调度研究[J], 水力发电学报, 2010, 29(3):18-22. (ZHOU Jia, MA Guangwen, ZHANG Zhigang. Study on the mid-long term optimal dispatching of cascaded hydropower stations on Yalong River based on POA modified adaptive algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3):18-22. (in Chinese))
- [7] 刘攀,郭生练,李玮,等. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2006, 29(4):78-83. (LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei, et al. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 29(4):78-83. (in Chinese))
- [8] 何向阳,周建中,张勇传,等. 基于改进 NSGA-II 的梯级水电站多目标发电优化调度[J]. 武汉大学学报:工学版, 2011, 44(6):715-719. (HE Xiangyang, ZHOU Jiangzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Multiobjective optimal dispatching of cascade hydropower stations using improved NSGA-II [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(6):715-719. (in Chinese))
- [9] 朱记伟,张洪波,辛琛,等. 水库调度 PSO 优化模型及求解方法[J]. 系统工程, 2010, 28(1):105-112. (ZHU Jiwei, ZHANG Hongbo, XIN Sheng, et al. PSO Model and calculation method to reservoir optimal operation[J]. Systems Engineering, 2010, 28(1):105-112. (in Chinese))
- [10] 向波,纪昌明,罗庆松. 免疫粒子群算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2008, 36(2):198-201. (XIANG Bo, JI Changming, LUO Qinsong. Immune particle swarm optimization algorithm and its application in reservoir operation optimization[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(2):198-201. (in Chinese))
- [11] 徐刚,马光文,梁武湖,等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):397-400. (XU Gang, MA Guangwen, LIANG Wuhu, et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3):397-400. (in Chinese))
- [12] 权先璋,李承军,张士军,等. 水电站优化线性调度规则研究[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(12):36-38. (QUAN Xianzhang, LI Chengjun, ZHANG Shijun, et al. A study on the optimal linear dispatching rules for hydropower station[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(12):36-38. (in Chinese))
- [13] 李承军,陈毕胜,张高峰. 水电站双线性调度规则研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1):11-15. (LI Chengjun, CHEN Bisheng, ZHANG Gaofeng. Study on bilinear dispatching rule of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1):11-15. (in Chinese))
- [14] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2001.
- (收稿日期:2013-05-07 编辑:骆超)

(上接第 43 页)

- [8] 查甫生,刘松玉,杜延军. 石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2007, 37(2):339-344. (ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun. Experiment on improvement of expansive clays with lime-fly ash [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2):339-344. (in Chinese))
- [9] 陈爱军,杨和平. 石灰改良汉中膨胀土路堤的施工控制[J]. 中外公路, 2009, 29(4):185-188. (CHEN Aijun, YANG Heping. Construction control of lime improvement of expansive soil embankment in Hanzhong [J]. Chinese and Foreign Highway, 2009, 29(4):185-188. (in Chinese))
- [10] 魏永耀,孙树林,郑华章. 膨胀土-胶粉(ESR)强度特性室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4):543-547. (WEI Yongyao, SUN Shulin, ZHEN Huazhang. Laboratory tests on uniaxial compressive strength of expansive soil-rubber[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4):543-547. (in Chinese))
- [11] 肖杰,王保田,孙衣春,等. 水泥石灰复合改良膨胀土试验[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2):9-13. (XIAO Jie, WANG Baotian, SUN Yichun, et al. Experimental research on the stabilized lime-cement expansive soil [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2):9-13. (in Chinese))
- [12] 李庆鸿. 新建时速 200 公里铁路改良膨胀土路基施工技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007:13-19.
- (收稿日期:2013-04-12 编辑:骆超)