

长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究Ⅰ： 模型原理及求解

黄 草^{1,2}, 王忠静^{1,2}, 李书飞³, 陈肃利³

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

3. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 水库群调度中发电与供水、生态等目标既非完全对立也非完全协调, 其优化调度决策非常复杂。本文以长江上游 15 座大型水库群联合调度为背景, 研究建立了包含发电、河道外供水和河道内生态用水等目标的非线性优化调度模型, 以逐步优化算法(POA)为基础, 引入优化窗口(L)和滑动距离(l)两个参数, 提出了扩展型逐步优化算法(E-POA)以提高非线性模型的求解效率与效能。经与线性全局优化策略相比, E-POA 方法有效、解集合理。长江上游 15 座大型水库长系列联合多目标调度计算结果表明, 水库群调度在发电、供水、生态等目标存在不对称博弈关系, 河道外供水与河道内生态用水竞争强烈, 发电与河道内供水竞争较弱。当优化计算的总发电量为总设计发电量的 96.3% 时, 系统的发电量、河道外供水和河道内生态用水目标可达成较好的协调统一。多年平均条件下, 15 座水库群联合调度的总期望发电量为 2 625.8~2 700.1 亿 kW·h, 略小于总设计发电量。

关键词: 长江上游; 水库群; 多目标调度; 优化模型; 水资源综合利用

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.09.001

1 研究背景

长江是中国第一大河, 水、电资源丰富, 航运发达。2010 年末, 三峡水库成功蓄水至正常蓄水位 175 m, 标志着三峡水库将全面发挥防洪、航运和发电等综合效益。与此同时, 长江上游其他大型水库也按计划建设和陆续建成, 投入运行。如何调度长江上游这个世界上最大规模的水库群, 协调其社会、经济和生态环境效益, 成为国内外研究的热点之一。

对于长江上游水库群的联合调度, 已有一些研究成果。在水库群的发电调度上, 有陈洋波等^[1]研究的清江隔河岩和高坝洲梯级的发电量和保证出力问题, 高仕春等^[2]研究的三峡和清江梯级水库群联合调度的补偿效益问题, 程春田等^[3]研究的乌江梯级水库群的优化调度图, 黄炜斌等^[4]研究的雅砻江梯级联合优化调度的优越性, 杨春花等^[5]研究的金沙江下游梯级和三峡梯级的联合发电调度。在水库群调度的多目标问题上, 有许继军等^[6]从定性角度讨论的水库群联合调度的布局问题, 刘丹雅等^[7]讨论的三峡以上水资源综合利用目标协调问题, 以及其他学者针对长江梯级水库群运行下游供水、防洪、发电以及生态的影响等开展的研究^[8-11]。目前看, 上述研究从地域上涉及了长江上游的干流、支流、或干流与 1~2 个支流, 从目标上涉及了发电目标的定量优化, 以及供水目标、生态目标和防洪目标的约束分析等, 是对长江上游水库群多目标联合调度问题在实践和方法上的有益探讨。

本文以长江上游已建、在建和规划的 15 座巨型水库构成的水库群联合调度问题为背景, 以发电、河道外供水、河道内生态用水等多目标协调为方向, 研究建立水库群多目标非线性优化调度模

收稿日期: 2014-04-24; 网络出版日期: 2014-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20140617.1636.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91125018, 50979040)

作者简介: 黄草(1985-), 男, 湖南衡阳人, 博士生, 主要从事水资源管理研究。E-mail: huangcao04@gmail.com

通讯作者: 王忠静(1963-), 男, 山东莱芜人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zj.wang@tsinghua.edu.cn

型，讨论大规模非线性多目标问题的优化策略，定量分析水库群联合调度在发电、供水、生态方面的不对称博弈关系，评价多目标协调下的长江上游15座水库的发电量目标值、河道外供水目标值以及生态用水量保障程度，为更好发挥水库群综合作用提供技术参考。

2 模型及求解

根据长江上游建设与规划的大型、特大型水利工程，水资源开发利用与保护现状，以及供水单元(河流、水库等)和用水单元(社会经济、生态环境等)的拓扑关系，概化水库群系统(图1)，构建长江上游水库群多目标优化调度模型(包括目标函数、约束条件及求解策略3部分)。

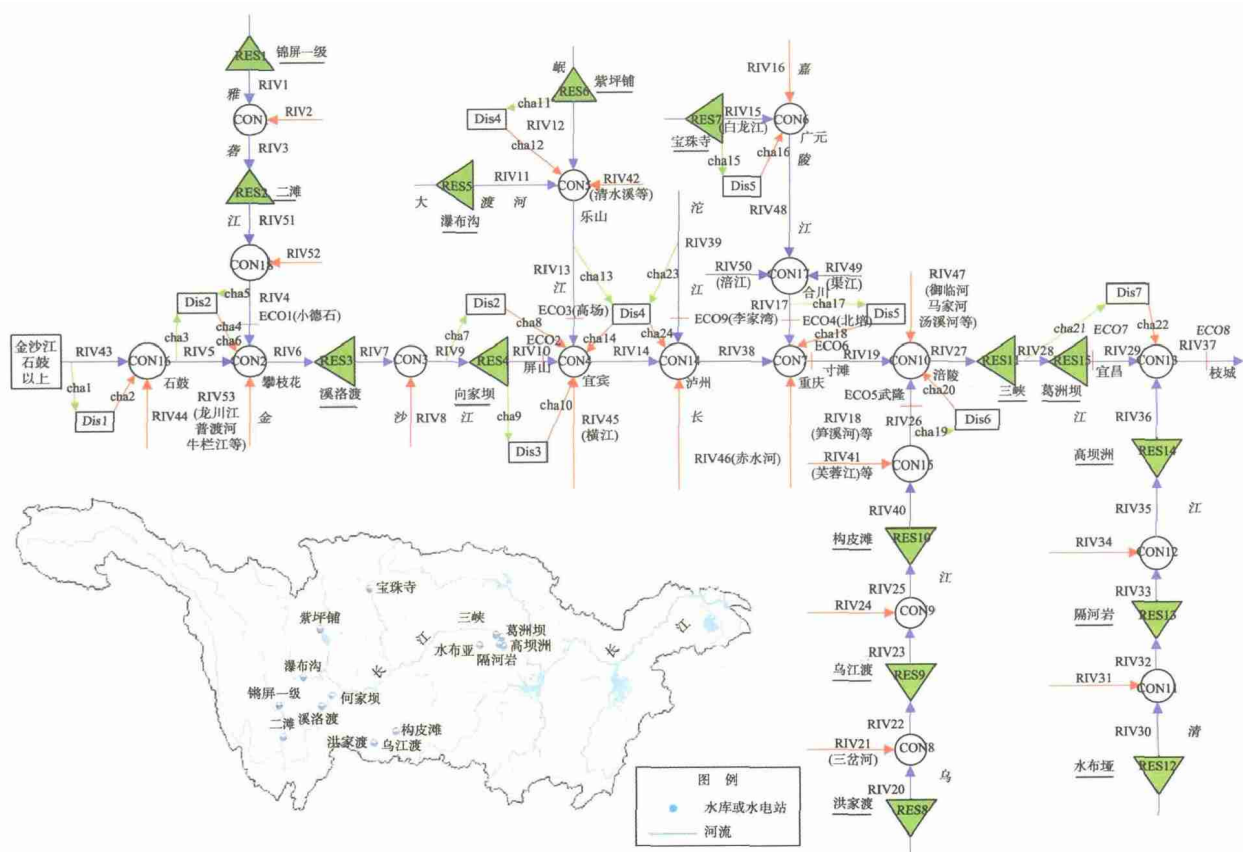


图1 长江流域上游水库群系统概化图

2.1 目标函数 长江上游水库群优化调度目标包括发电、河道外供水和河道内生态用水目标。

(1)发电目标：发电量与最大可能发电量的差值最小。

$$\min f_1 = \begin{cases} 0 & E_{it} < P\eta_i \Delta H_{it} Rres_{it} \Delta t_i \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (E_{it} - P\eta_i \Delta H_{it} Rres_{it} \Delta t_i) & E_{it} \geq P\eta_i \Delta H_{it} Rres_{it} \Delta t_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta H_{it} = H_{up} \left(\frac{Vres_{i-1} + Vres_{it}}{2} \right) - H_{lo} Rres_{it} \quad (2)$$

式中： T 为调度时段数； N 为水库数； E_{it} 为水库 i 时段 t 的最大可能发电量， $E_{it} = C_i \Delta t_i$ ， C_i 为电站 i 的装机容量； P 为量纲转换系数； η_i 为水库 i 的出力系数； $Rres_{it}$ 为水库 i 时段 t 下泄流量； $Vres_{it}$ 为水库 i 时段 t 末的蓄水量； Δt_i 为时段 t 时长； ΔH_{it} 为水库 i 时段 t 的发电水头，是水库蓄水位 H_{up} 与尾水位 H_{lo} 之差，这里假设库水位 H_{up} 为平均蓄水量 $(Vres_{i-1} + Vres_{it})/2$ 的幂函数，尾水位 H_{lo} 为泄水量 $Rres_{it}$ 的幂函数。

(2)供水目标：社会经济缺水最小。

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (D_{kt} - S_{kt}) \quad (3)$$

$$S_{kt} = \sum_{i=1}^N s_{ikt} + \sum_{j=1}^M s_{jkt} \quad (t=1, 2, \dots, T; k=1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

式中： K 为社会经济需水区数目； D_{kt} 为时段 t 需水区 k 的总社会经济需水量； S_{kt} 为时段 t 需水区 k 的总社会经济供水量， $S_{kt} \leq D_{kt}$ ； s_{ikt} 表示时段 t 水库 i 供给需水区 k 的社会经济供水量； s_{jkt} 表示时段 t 河道 j 供给需水区 k 的社会经济供水量。

(3)生态目标：最小生态缺水最小和适宜生态缺水最小。

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \begin{cases} 0 & R_{lt} \geq E_{lt}^{\min} \\ E_{lt}^{\min} - R_{lt} & R_{lt} < E_{lt}^{\min} \end{cases} \quad (5)$$

$$\min f_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \begin{cases} 0 & R_{lt} \geq E_{lt}^{\text{app}} \\ E_{lt}^{\text{app}} - R_{lt} & R_{lt} < E_{lt}^{\text{app}} \end{cases} \quad (6)$$

式中： L 为生态流量控制断面总数； E_{lt}^{\min} 为断面 l 时段 t 的最小生态流量； E_{lt}^{app} 为断面 l 时段 t 的适宜生态流量， $E_{lt}^{\min} < E_{lt}^{\text{app}}$ ； R_{lt} 为断面 l 时段 t 的实际流量。

(4)总目标：各目标间协调程度最佳。对不可公度的目标，采用权重系数来体现决策者对不同目标的偏好，并以非劣解距各单目标最优值的偏差相对量为协调方程^[12-13]：

$$\min Z = \sum_{i=1}^4 \left(\omega_i \frac{f_i^{\max} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right) \quad (7)$$

式中： f_i^{\max} 、 f_i^{\min} ($i=1, 2, 3, 4$) 分别表示分目标 i 的最大值和最小值，可以通过分别优化单目标的损益表求得； $\sum_{i=1}^4 \omega_i = 1.0$ 。

2.2 约束条件 主要包括水量平衡约束和边界约束。

(1)水量平衡约束：

水库：

$$V_{res_{it}} = V_{res_{i,t-1}} + Q_{res_{it}} - S_{res_{it}} - R_{res_{it}} - L_{res_{it}} \quad (8)$$

河道：

$$S_{res_{it}} = \sum_{k=1}^K s_{ikt} \quad (9)$$

$$Q_{riv_{jt}} = S_{riv_{jt}} + R_{riv_{jt}} + L_{riv_{jt}} \quad (10)$$

$$S_{res_{jt}} = \sum_{k=1}^K s_{jkt} \quad (11)$$

式中： $Q_{res_{it}}$ 为水库 i 时段 t 的入库水量； $S_{res_{it}}$ 为水库 i 时段 t 的总供水量； $R_{res_{it}}$ 为水库 i 时段 t 的出库水量； $L_{res_{it}}$ 为水库 i 时段 t 的水量损失； $Q_{riv_{jt}}$ 为河道 j 时段 t 的入流量； $S_{riv_{jt}}$ 为河道 j 时段 t 的总供水量； $R_{riv_{jt}}$ 为河道 j 时段 t 的出流量； $L_{riv_{jt}}$ 为河道 j 时段 t 的水量损失。

(2)边界约束：

$$V_{res_{it}}^{LB} \leq V_{res_{it}} \leq V_{res_{it}}^{UB} \quad (12)$$

$$0 \leq S_{res_{it}} \leq S_{res_{it}}^{UB} \quad (13)$$

$$R_{res_{it}}^{LB} \leq R_{res_{it}} \leq R_{res_{it}}^{UB} \quad (14)$$

$$0 \leq R_{riv_{jt}} \leq R_{riv_{jt}}^{UB} \quad (15)$$

式中： $V_{res_{it}}^{LB}$ 、 $V_{res_{it}}^{UB}$ 分别为水库 i 时段 t 蓄水量 $V_{res_{it}}$ 的下边界和上边界； $S_{res_{it}}^{UB}$ 为水库 i 时段 t 的

最大供水量； $Rres_{it}^{LB}$ 、 $Rres_{it}^{UB}$ 分别为水库 i 时段 t 出库水量 $Rres_{it}$ 的下边界和上边界； $Rriv_{jt}^{UB}$ 为河道 j 时段 t 的最大过流量； $Sriv_{jt}^{UB}$ 为河道 j 时段 t 的最大供水量。

2.3 E-POA 求解 由式(1) 式(15)定义的水库群优化调度模型是复杂的多目标非线性优化模型，其复杂程度与水库数目成指数关系^[14]。为克服维数灾问题，Howson 等人提出了逐步优化算法^[15-17] (Progressive Optimality Algorithm, POA)，将复杂的多阶段决策问题转化为一系列两阶段问题进行求解。但实际应用表明^[18-19]，POA 算法在求解大规模水库群优化调度模型时收敛很慢，且难以保证获得全局最优解。基于经典 POA 算法，这里引入 2 个参数：优化窗口(L)和滑动距离(l)，将 POA 算法中的两阶段优化和单步移动，扩展为多阶段优化和多步移动，形成扩展型逐步优化算法(Extended POA, E-POA)。

其原理和步骤如下：

(1)给定一组初始轨迹(水库群库容向量) $V_{nT}^{(k)}(t=0, 1, 2, \dots, T; V_{nT}^{(k)}=(V_0^{(k)}, V_1^{(k)}, \dots, V_T^{(k)})^T)$ ，

置 $k=0$ ；其中 k 为逐步迭代轮次数， n 为水库总数， T 为调度期时段数，且 $V_0^{(k)}$ 和 $V_1^{(k)}$ 为已知的水库群的库容初始值和终端值 V_T 。

(2)固定 $V_0^{(k)}$ 和 $V_L^{(k)}$ ，优化 $V_1^{(k)}, V_2^{(k)}, \dots, V_{L-1}^{(k)}$ ，获得当前状态的最优状态变量值 $V_1^{*(k)}, V_2^{*(k)}, \dots, V_{L-1}^{*(k)}$ ；用新值 $V_1^{*(k)}, V_2^{*(k)}, \dots, V_{L-1}^{*(k)}$ 代替 $V_1^{(k)}, V_2^{(k)}, \dots, V_{L-1}^{(k)}$ ；其中优化窗口(L)即为单步优化的时段跨度。

(3)优化窗口往前移动 l 时段，再固定 $V_l^{(k)}$ 和 $V_{L+l}^{(k)}$ ，求解最优的 $V_{l+1}^{*(k)}, V_{l+2}^{*(k)}, \dots, V_{L+l-1}^{*(k)}$ ；其中滑动距离(l)为每步计算后优化窗口往前移动的时段跨度， $l < L$ ；以此类推，完成一轮迭代。

(4)用 $V_t^{*(k)}(t=0, 1, 2, \dots, T)$ 分别作为新值 $V_t^{(k+1)}$ ；并计算评价函数 $f^{(k+1)}=F(V_t^{(k+1)})$ ，若满

足 $\frac{[f^{(k+1)}-f^{(k)}]^2}{[f^{(k+1)}]^2+[f^{(k)}]^2} \leq \varepsilon$ (ε 为极小正数， ε 越小表示精度越高)，则迭代结束；若不满足，则用 $V_t^{(k+1)}$ 代

替 $V_t^{(k)}$ ，令 $k=k+1$ ，重复步骤(2) 步骤(4)。

(5)以 $V_t^{(k+1)}$ 为基础，进一步求取各时段最优的发电量、供水量以及下泄流量等。

以上计算中，当 $L=2, l=1$ 时，E-POA 退化为 POA。理论证明，E-POA 较 POA 的收敛条件要求弱；数值实验表明，恰当的(L, l)可大大提高搜索能力和求解效率。限于篇幅，已另文阐述^[20]。这里为分析 E-POA 的有效性和合理性，将其优化计算结果与长系列全局线性优化计算结果进行对比。

尽管 E-POA 的优化窗口超过了两阶段，但由于发电函数的非线性，其仍难以一次性长系列全局优化，只能多阶段优化多次滑动直至全局。作为对照，设计了全局线性优化策略，亦即将模型目标简化为社会经济供水和生态环境用水，采用线性全局方法，优化水库群供水调度，然后依据供水优化调度的结果，模拟系统发电量。这样，系统就从非线性问题转化为线性问题，作为与 E-POA 的对比方案。

以 1959—2006 年共计 48 年实测流量系列为水文输入，以宏观经济水资源模型^[12, 21]预测结果和《长江流域综合规划》成果协调值为需水输入，以《长江流域水资源综合规划》成果为河道内最小和适宜生态需水量输入。模型优化的计算时间步长为旬，汛期进行日防洪校核。

3 结果与讨论

3.1 非对称博弈 考虑到长江的特点，将最小生态需水量与适宜生态需水量合并，以简化权重空间。令 $w_4=0.5w_3$ ， $w_1+w_2+w_3=1.0$ ，按单目标最优方式，计算最大损益表如表 1。

表1 调度目标损益表

单目标优化方案	发电量/(亿 kW·h)	社会经济缺水/亿 m ³	生态环境缺水/亿 m ³
Max($-f_1$), 发电量最大	2 731.9	438.8	33.3
Min(f_2), 经济缺水最小	2 609.0	1.1	68.3
Min(f_3), 生态缺水最小	2 617.0	40.9	3.8

从表1不难看出,主对角线上的值是各目标在系统单目标优化下的结果,即在系统中的可能最优值,称为理想点。发电理想点为 2 731.9 亿 kW·h,社会经济缺水理想点为 1.1 亿 m³,生态环境缺水理想点为 3.8 亿 m³。

进一步采用切比雪夫方法^[21-22]离散空间并求解,得到多目标的非劣解集(图2)。其中,发电缺损量=理想点-计算量。将图2投影到各目标面,得到三个目标间的两两关系的曲线族(图3)。

图3(a)为社会经济缺水与生态环境缺水的关系。当发电缺损值一定时,社会经济缺水增加,生态环境缺水减少;当发电缺损值较小时,生态环境缺水的小幅增加,能引起社会经济缺水的大幅减少;当发电缺损值较大时,生态环境缺水的大幅增加只能引起社会经济缺水的小幅减少量,该情况下减少生态环境供水对增加社会经济供水影响有限。

图3(b)是发电缺损值与生态环境缺水的关系。当社会经济缺水较小时,发电缺损量的小幅增加,能引起生态环境缺水的大幅减少,此时减少发电量能显著增加生态环境供水量;当社会经济缺水较大时,发电缺损量的大幅增加,仅能引起生态环境缺水的小幅减少量,此时减少发电量对增加生态环境供水量的影响降低。

图3(c)是发电缺损值与社会经济缺水的关系。当生态环境缺水一定时,发电缺损量随社会经济缺水的增加而减少。但不同生态环境缺水对这种关系的影响不大,无论生态环境缺水大小,发电缺损量的增加总能减少相应的社会经济缺水,反之亦然。

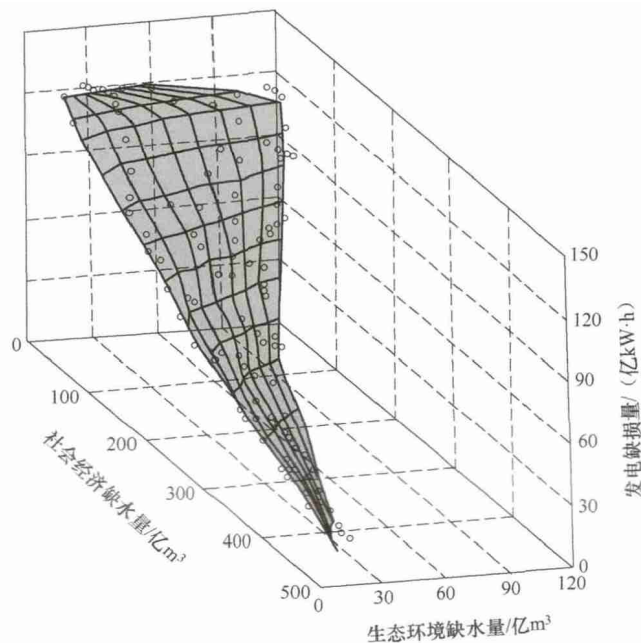


图2 长江上游水库群多目标优化调度非劣解集

3.2 E-POA 有效性 从图3所示的非劣解集中挑选三个差异较大点形成方案A、方案B和方案C作为比较,其3目标的非线性模型及相应的2目标线性模型的事前偏好权重组合如表2。

表3列出了系统的规划设计值以及A、B、C三种权重方案在线性全局优化与非线性E-POA优化下的结果及其差异。线性全局优化中不包含发电量目标,故其发电量小于非线性优化结果,相应地,其社会经济供水量和生态环境供水量大于非线性逐步优化结果。在发电目标上,非线性优化的

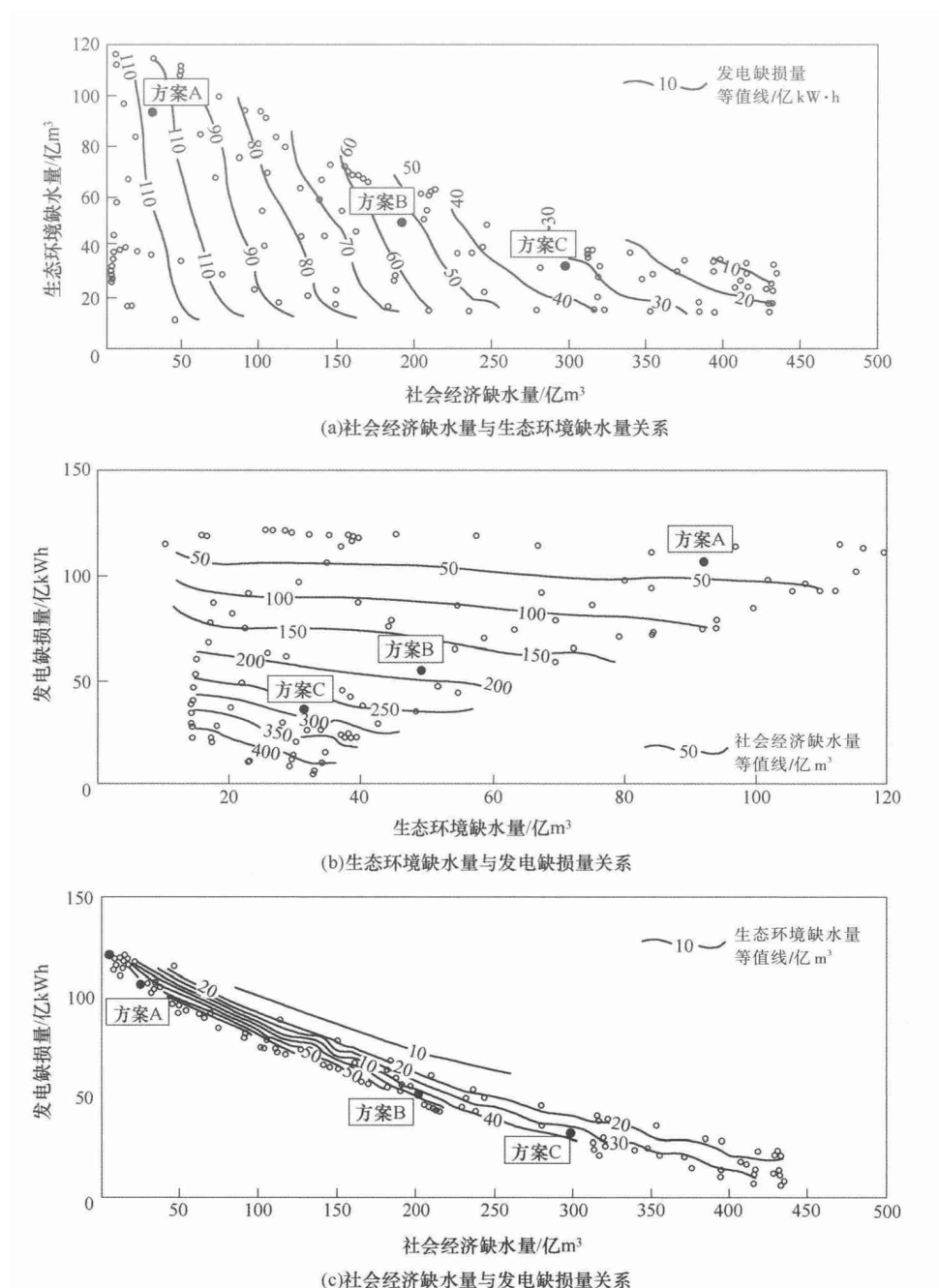


图3 长江上游水库群多目标的非对称博弈关系

表2 优选方案及其权重组合

方案	非线性逐步			线性全局	
	发电(w_1)	社会经济(w_2)	生态环境(w_3)	社会经济(w_2)	生态环境(w_3)
方案A	0.54	0.36	0.1	0.78	0.22
方案B	0.7	0.2	0.1	0.67	0.33
方案C	0.75	0.15	0.1	0.60	0.40

A、B、C三方案的发电量分别较规划设计值低3.8%、1.7%和0.9%，而线性优化值则分别低8.8%、7.9%和7.8%；在社会经济目标上，非线性优化的A、B、C三方案的社会经济供水量分别较规划设计值低6.1%、38.6%和61.0%，而线性优化值则分别低0.1%、3.4%和4.4%；在生态环境目标上，非线性优化的A、B、C三方案的生态环境供水量分别较规划设计值低6.0%、3.0%和

表3 不同优化求解策略的目标优化值差异比较

方案	优化目标	非线性逐步		线性全局		两种策略的差异	
		模型值	与规划相对差/%	模型值	与规划相对差/%	绝对差	相对差/%
		①	②=(①-X)/X	③	④=(③-X)/X	⑤=①-③	⑥=⑤/①
规划设计	设计发电量/(亿kW·h)	2 727.5		2 727.5			
	社会经济需水量/(亿 m ³)	491.5		491.5			
	适宜生态需水量/(亿 m ³)	1 543.7		1 543.7			
A	发电量/(亿kW·h)	2 625.8	-3.8	2 484.6	-8.8	141.2	5.4
	社会经济供水量/(亿 m ³)	461.7	-6.1	491.0	-0.1	-29.7	-6.4
	适宜生态供水量/(亿 m ³)	1 451.2	-6.0	1 531.9	-0.8	-80.7	-5.6
B	发电量/(亿kW·h)	2 678.6	-1.7	2 510.2	-7.9	168.4	6.3
	社会经济供水量/(亿 m ³)	301.9	-38.6	474.5	-3.4	-172.6	-57.2
	适宜生态供水量/(亿 m ³)	1 494.5	-3.2	1 540.4	-0.2	-45.9	-3.1
C	发电量/(亿kW·h)	2 700.1	-0.9	2 512.0	-7.8	188.4	6.9
	社会经济供水量/(亿 m ³)	191.9	-61.0	470.1	-4.4	-278.2	-145.0
	适宜生态供水量/(亿 m ³)	1 510.0	-2.2	1 540.5	-0.2	-30.5	-2.0

2.2 %，而线性优化值则分别仅低 0.8 %、0.2 %和 0.2 %。可见，非线性优化策略对 3 个目标的博弈关系更为敏感，线性优化策略对各目标的改善不大。

3.3 目标协调及方案推荐

3.3.1 发电量 表4列出了不同方案下各水电站发电量期望值。总体看，水库群联合调度后，各方案的年均总发电量均小于设计发电量，方案 A、B、C(图3)的年均发电量比设计发电量分别少 99.3、54.9 和 25.4 亿 kW·h。其中，二滩、溪洛渡、向家坝、紫坪铺、宝珠寺、洪家渡、构皮滩、三峡和水布垭的发电量小于设计值，紫坪埔和宝珠寺水库因直接承担社会经济供水任务，其发电量与设计发电量的差值更大；锦屏I级、瀑布沟、乌江渡、隔河岩、高坝洲和葛洲坝的发电量大于设计值，高

表4 不同方案下各水库电站期望发电量与设计发电量比较

水库 /水电站	设计发电量 /(亿kW·h)	模型发电量/(亿kW·h)			相对差值/%		
		方案A	方案B	方案C	方案A	方案B	方案C
	①	②	③	④	(②-①)/①	(③-①)/①	(④-①)/①
锦屏I级	167.85	184.4	184.6	184.5	9.9	10.0	9.9
二滩	179	178.6	178.7	178.6	-0.2	-0.1	-0.2
瀑布沟	145.8	150.5	150.9	150.8	3.2	3.5	3.4
紫坪铺	34.2	23.5	23.5	23.5	-31.4	-31.3	-31.3
宝珠寺	22.78	19.5	19.6	19.6	-14.2	-14.0	-14.1
洪家渡	15.94	14.4	14.4	14.4	-9.5	-9.5	-9.6
乌江渡	33.4	38.0	38.0	38.0	13.8	13.8	13.8
构皮滩	96.67	91.8	91.9	91.9	-5.0	-4.9	-5.0
水布垭	39.2	38.2	38.3	38.3	-2.6	-2.4	-2.4
隔河岩	30.4	32.0	32.1	32.0	5.3	5.4	5.4
高坝洲	8.98	10.3	10.3	10.3	15.1	15.1	15.0
溪洛渡	640	614.1	614.9	614.6	-4.1	-3.9	-4.0
向家坝	307.5	296.4	307.0	310.9	-3.6	-0.2	1.1
三峡	846.8	767.8	802.5	816.7	-9.3	-5.2	-3.6
葛洲坝	157	166.2	171.8	176.0	5.8	9.5	12.1
合计	2725.5	2625.8	2678.6	2700.1	-3.7	-1.7	-0.9

附注：+ 表示模型计算的年均发电量大于该水库或水电站的设计年均发电量；- 表示模型计算的年均发电量小于该水库或水电站的设计年均发电量。

坝洲水电站因上游水布垭和隔河岩水库的流量调节，其发电量较设计值增加更大；三峡水库在3个方案下的期望发电量与设计发电量的绝对差值最大，分别为-79.0、-44.3和-30.1亿kW·h，二滩的期望值与设计值绝对差值最小，分别为-0.4、-0.3和-0.4亿kW·h。尽管水库群调度后各水库的期望发电量与设计值存在差异，但总期望发电量与总设计发电量的相对差异并不大，3个方案下分别只为-3.7%、-1.7%和-0.9%，表明长江上游水库群可在发电、社会经济供水与生态环境需水间较好协调。

3.3.2 社会经济缺水量 表5列出了不同供水方案下长江上游6个二级区的社会经济缺水量及缺水率。方案A，B，C的社会经济总缺水量分别为：29.8、189.6和299.6亿m³，缺水率分别为6.1%、38.6%和61.0%，较发电比，矛盾更加突出，因此应统筹协调，不片面追求系统发电量最大，以使区域社会经济缺水量可维持在较小的水平。长江上游经济社会供水矛盾主要出现在金沙江石鼓以下、岷沱江和嘉陵江3个二级区，它们受调度中多目标偏好的影响相对敏感，应适当提高这些区域的社会经济供水优先级。

表5 长江上游各二级区不同方案的社会经济缺水量

二级区	需水量 /亿 m ³ ①	缺水量/(亿 m ³)			缺水率/%		
		方案 A ②	方案 B ③	方案 C ④	方案 A ②/①	方案 B ③/①	方案 C ④/①
金沙江石鼓以上	1.9	0	0	0	0	0	0
金沙江石鼓以下	85.4	11.87	57.31	76.50	13.9	67.1	89.6
岷沱江	147.5	14.70	86.51	101.45	10.0	58.7	68.8
嘉陵江	101.2	2.79	35.39	60.21	2.8	35.0	59.5
乌江	55.0	0.18	0.35	12.09	0.3	0.6	22.0
宜宾至宜昌	100.6	0.27	10.09	49.37	0.3	10.0	49.1
合计	491.5	29.8	189.6	299.6	6.1	38.6	61.0

3.3.3 生态环境缺水量 表6列出了不同方案下长江上游重点控制断面的最小生态和适宜生态的缺水情况。结果表明，多年平均意义下，研究区的最小生态缺水量和缺水率、适宜生态缺水量和缺水率均较小。方案A，B，C的最小生态缺水率分别仅为1.5%、0.1%和0.1%，适宜生态缺水率分别为6.0%、3.2%和2.2%。具体到断面，屏山，寸滩和宜昌等干流断面最小和适宜生态需水均能很好的满足，最大适宜生态缺水率不超过3.0%；北碚、李家湾等支流断面的适宜生态流量存在一定缺口，最大缺水率约为16%。可见，在多年平均情况下，长江上游区河道外引水对河道生态内生态供水的影响较小，但在极端干旱年份适宜生态缺水量将不容忽视，此时要积极主动地发挥水库群的生态用水调节功能。

表6 长江上游重要控制断面最小和适宜生态缺水量

控制 断面	需水量/(亿 m ³)		最小生态缺水量/(亿 m ³)			最小生态缺水率/%			适宜生态缺水量/(亿 m ³)			适宜生态缺水率/%		
	最小生态	适宜生态	方案 A	方案 B	方案 C	方案 A	方案 B	方案 C	方案 A	方案 B	方案 C	方案 A	方案 B	方案 C
	①	②	③	④	⑤	③/①	④/①	⑤/①	⑥	⑦	⑧	⑥/②	⑦/②	⑧/②
小德石	104.4	175	0.1	0	0	0.1	0	0	2.1	2.1	2.1	1.2	1.2	1.2
屏山	342.2	492.9	0.5	0.6	0.7	0.2	0.2	0.2	3.0	2.3	2.4	0.6	0.5	0.5
高场	173.8	296.1	6.2	0	0	3.6	0	0	10.1	0.4	0.4	3.4	0.1	0.1
北碚	81.1	229	5.8	0.0	0.0	7.1	0	0	36.3	21.4	12.3	15.8	9.3	5.3
武隆	84.8	171	0.0	0.1	0.1	0	0.1	0.1	4.14	4.5	3.14	2.4	2.6	1.8
寸滩	792.5	1188	1.7	0.1	0	0.2	0	0	35.1	16.8	11.7	3	1.4	1
宜昌	973.2	1543.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
李家湾	10.7	37	0.07	0.1	0.1	0.7	0.7	0.7	1.82	1.8	1.8	4.9	4.9	4.9
合计	973.2	1543.7	14.3	0.9	0.9	1.5	0.1	0.1	92.5	49.2	33.7	6.0	3.2	2.2

3.3.4 方案推荐 综合分析两种优化3个方案，A方案在3个目标中均有侧重，各目标与理想值的偏差基本相当，应为首推荐方案。此方案下，两种策略的社会经济供水量和生态环境供水量与需水量的绝对差值以及相对差值均较小，为-6.4%和-5.6%，但非线性优化策略可赢得141.2亿kW·h的年发电量，效益可观。可见，采用非线性逐步优化求解策略综合考虑了发电，社会经济供水和生态环境供水的多目标博弈，比线性全局优化求解策略得到的非劣解集更全面，且非线性逐步优化策略的方案A中各目标的模型值与规划设计的各目标值的相对差值彼此接近，分别为3.8%、6.1%和6.0%，较为合理。

4 结论

随着经济发展和社会进步，人们越来越重视水库群的多目标协调调度和水资源的综合利用。本文基于POA的原理，引入优化窗口(L)和滑动距离(l)两个参数，提出了E-POA以提高非线性优化模型的求解效率与效能，应用结果表明该方法有效，解集合理。对长江上游15座大型水库群多目标优化分析表明，长江上游水库群联合优化调度在发电、供水、生态等目标间的不对称博弈关系，当发电量一定时，社会经济供水量与生态环境供水量呈强竞争关系，并随着发电量增加而竞争性增加；当社会经济供水量一定时，发电量与生态环境供水量呈弱竞争关系，并随着社会经济供水量减少而减弱；发电量与社会经济供水量始终为强竞争关系，随生态供水量的变化较小。

整体而言，长江上游虽然水资源总量丰富，但发电量、社会经济供水量和生态环境供水量之间仍存在矛盾；不同的水库群调度策略和水资源分配方案对各电站的发电量、各需水二级区的社会经济供水量以及各生态断面的生态供水量均存在较大影响；故优化水库群联合调度策略，充分挖掘水资源综合效益十分必要。水库群联合优化调度框架下，当系统的年均发电量的期望值约为设计年均发电量的96.3%时，区域社会经济需水量和生态环境需水量也能较好满足，多目标间实现较好的协调。

本文仍有一些问题值得深入研究，如长江流域大量中小型水库未计入模型。当统筹这些中小水库的供水能力时，实际的社会经济缺水应小于模型计算值。

参 考 文 献：

- [1] 陈洋波,胡嘉琪.隔河岩和高坝洲梯级水电站水库联合调度方案研究[J].水利学报,2004(3):47-52.
- [2] 高仕春,万飏,梅亚东,等.三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究[J].水利学报,2006,37(4):504-507.
- [3] 程春田,杨凤英,武新宇,等.基于模拟逐次逼近算法的梯级水电站群优化调度图研究[J].水力发电学报,2010,29(6):71-77.
- [4] 黄炜斌,马光文,王和康,等.雅砻江下游梯级电站群中长期优化调度模型及其算法研究[J].水力发电学报,2009,28(1):1-4.
- [5] 杨春花,许继军.金沙江下游梯级与三峡梯级水库联合发电调度[J].水电能源科学,2011,29(5):142-144.
- [6] 许继军,陈进.长江上游大型水电站群联合调度发展战略研究[J].中国水利,2011(4):24-28.
- [7] 刘丹雅.三峡及长江上游水库群水资源综合利用调度研究[J].人民长江,2010,41(15):5-9.
- [8] 范继辉.梯级水库群调度模拟及其对河流生态环境的影响——以长江上游为例[D].北京:中国科学院,2007.
- [9] 田雨.长江上游复杂水库群联合调度技术研究[D].天津:天津大学,2012.
- [10] 张睿,周建中,袁柳,等.金沙江梯级水库消落运用方式研究[J].水利学报,2013,44(12):1399-1408.
- [11] 王煜,戴会超,王冰伟,等.优化中华鲟产卵生境的水库生态调度研究[J].水利学报,2013,44(3):319-326.
- [12] 翁文斌,王忠静,赵建世.现代水资源规划——理论、方法和技术[M].北京:清华大学出版社,2008.

- [13] 廖四辉,程绪水,施勇,等. 淮河生态用水多层次分析平台与多目标优化调度模型研究[J]. 水力发电学报,2010,29(4):14-19.
- [14] Hall W A, Butcher W S, Esogbue A. Optimization of operation of a multiple-purpose reservoir by dynamic programming[J]. Water Resource Research, 1968, 4(3):471-477.
- [15] Howson H R, Sancho N G F. A new algorithm for the solution of multi-state dynamic programming problems[J]. Mathematical Programming, 1975, 8(1):104-116.
- [16] Turgeon A. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality[J]. Water Resources Research, 1981, 17(3):481-486.
- [17] Nanda J, Bijwe P R, Kothari D P. Application of progressive optimality algorithm to optimal hydrothermal scheduling considering deterministic and stochastic data[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1986, 8(1):61-64.
- [18] Lucas N J D, Perera P J. Short-term hydroelectric scheduling using the progressive optimality algorithm[J]. Water Resources Research, 1985, 21(9):1456-1458.
- [19] Lee F N. A method to eliminate solution trapping in applying progressive optimality principle to short-term hydrothermal scheduling[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1989, 4(3):935-942.
- [20] 黄草. 水库群非线性优化调度模型及应用研究[D]. 北京:清华大学,2014.
- [21] 王忠静,熊雁晖,赵建世. 基于区域经济层次交互分析的流域需水预测方法[J]. 水力发电学报,2004,23(5):78-82.
- [22] 马真臻. 基于河流天然流量过程的生态评价及其用水调度研究[D]. 北京:清华大学,2012.

A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin I. Principle and solution of the model

HUANG Cao^{1,2}, WANG Zhong-jing^{1,2}, LI Shu-fei³, CHEN Su-li³

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract : In a multi-reservoir system, the operation objectives, such as hydropower generation, water supply and ecological protection are neither fully opposite nor fully coordinated, and the optimal joint operation decision of reservoirs is very complex. With the background of joint operation of 15 reservoirs in the Upper Yangtze River Basin, a nonlinear multi-objective optimization model is developed to coordinate hydropower generation, off-stream water use and in-stream water use in the paper. Based on the principle of POA(Progressive Optimality Algorithm), the extended POA(E-POA) is proposed to accelerate the efficiency and effectiveness of solving nonlinear optimization model by introducing two parameters, i.e. the optimization window(L) and the sliding distance(l). The operation model is solved by nonlinear progressive optimization strategy and compared with the results from linear global optimization strategy. The results indicate that the nonlinear progressive optimization strategy is acceptable and the set of solutions is reasonable. The results also show the asymmetry trade-offs among hydropower generation, water supply and ecological protection. It illustrates that the off-stream water use intensely compete with in-stream ecological water use, but the water use of hydropower generation softly compete with in-stream ecological water use. If the average annual hydropower capacity of the system approximates to 96.3 % of the original designed value, these three objectives can be balanced well, and the expected average annual hydropower capacity of the system is about 262.58-270.01BKH(Billion Kilowatt Hours), slightly less than the original designed value of the system.

Key words : the upper Yangtze River Basin; multi-reservoir operation; multi-objective operation; optimization model; comprehensive water resources utilization

(责任编辑:王学风)