文章编号：1000-8608(2016)04-0406-08

基于改进 PSO 算法的跨流域水库群联合调度图优化

彭安帮[1,2,3]，彭　勇*[3]，许　钦[1,2]，刘宏伟[1,2]，周惠成[3]

（1.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京　210029；
2.南京水利科学研究院 水文水资源研究所，江苏 南京　210029；
3.大连理工大学 水利工程学院，辽宁 大连　116024）

摘要：针对跨流域水库群优化调度具有高维非线性和动态性的特点，提出一种改进粒子群优化算法用于跨流域水库群引(调)水与供水联合调度图的求解.该算法针对基本粒子群优化算法易陷入局部最优且进化后期收敛速度慢的缺陷，引入交叉和变异策略、模拟退火策略和反射边界策略，以增加种群的多样性并提高算法的进化速度和全局搜索能力.数值测试证明了该算法用于求解高维复杂优化问题的有效性，实例研究也表明该算法提高了整个系统的供水与引水效益，是一种优化复杂水库群联合调度高效实用的方法.

关键词：跨流域调水；水库群优化调度；引水；供水；改进 PSO 算法

中图分类号：TV697.12　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.7511/dllgxb201604012

0　引　言

我国水资源时空分布不均，与社会经济发展水平及战略布局不相匹配，仅靠挖掘本流域的水资源潜力无法完全解决当地的水资源短缺问题.因此，跨流域调水已成为水资源重新分配和缓解缺水地区供需矛盾的重要途径.跨流域水库群联合调度具有以下特点：①涉及范围广，研究对象涉及多个流域和多个地区；②多目标性，涉及防洪、兴利、发电和生态等多个目标；③连通方式复杂，不仅有河库的自然连通，还有河库之间的人工连通；④调度复杂，在结构上水库间有串联、并联或串并混联关系，在功能上除需要满足自身、联合供水目标外，还需要考虑引调水的补偿调节与反调节作用.因此，构建科学合理的跨流域水库群联合调度图模型和寻求高效的求解算法是关键.

鉴于跨流域水库群联合优化调度是一个非线性、多峰、非凸函数的复杂优化问题，通常采用模拟-优化方法直接优化预设的联合调度图.然而，随着水库群规模的增大，各水库调度线形成高维解空间使求解过程不可避免地存在“维数灾”问题.传统优化算法如线性规划、非线性规划、动态规划等，在一定程度上存在求解困难、算法复杂等缺点，往往不能获得满意的优化解.与传统优化算法相比，启发式算法如免疫算法、遗传算法和粒子群优化(PSO)算法等，具有鲁棒性强、编码方式简单和隐含并行机制等特点，能有效避免复杂非线性优化问题的“维数灾”，提高模型的求解效率[1-3].

PSO 算法是一种新型进化技术，源于模拟鸟群社会行为[4].由于基本 PSO 算法存在易陷入局部最优的缺点，许多学者从惯性系数、算法融合、种群拓扑结构等方面进行改进，并在水库(群)优化调度中取得了较好的应用效果[5-8].已有的研究成果表明，粒子交叉、变异的遗传更新策略可以提高种群多样性[5]；模拟退火(SA)策略可以很好地平衡粒子的“开发”和“探测”能力[6]；反射边界策略使粒子更容易接近最优解[9].所以，本文将上述3种策略同时引入粒子群算法，用于求解跨流域水库群引(调)水与供水联合调度图模型，并验证模型及算法的有效性.

1　调度图模型

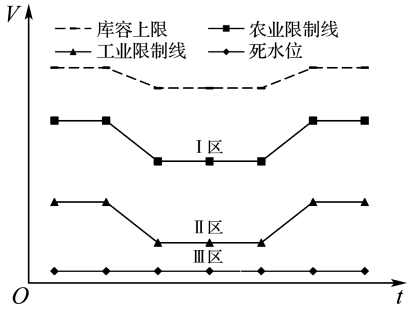
本文跨流域水库群联合调度图以各成员水库引(调)水与供水调度图的联合形式来表示.采用

收稿日期：2015-09-06；　**修回日期：**2016-03-15.
基金项目：国家自然科学基金重大国际(地区)合作研究项目(51320105010)；国家自然科学基金资助项目(51379027，51579148，51209139)；辽宁省自然科学基金资助项目(2015020608)；国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91547111).
作者简介：彭安帮(1985-)，男，工程师，E-mail：pengfei110ab@126.com；彭　勇*(1979-)，男，副教授，E-mail：pengyong@dlut.edu.cn.

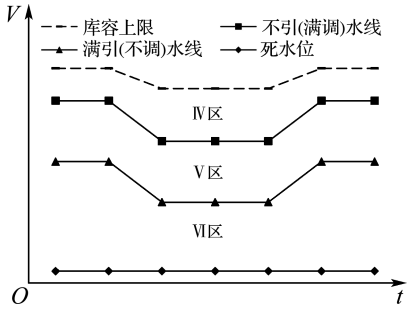
模拟-优化方法循环迭代求解相应的联合优化调度图，其中，模拟模块嵌入优化模块以寻求水库调度线的位置（调度参数）.

1.1　联合调度图

以工业和农业两个用水户供水目标为例，说明跨流域水库群联合调度图的基本形式（见图 1）及其使用规则（见表 1）. 其包括两类调度图：①供水调度图（图 1(a)），由用水户供水限制线组成，并按优先级顺序依次排列（用水户优先级越低，其供水限制线的位置越高），其将兴利库容划分为不同的供水调度区[10-11]，使用调度图时根据时段初蓄水量所处的调度区进行供水决策. ②引（调）水调度图（图 1(b)），由引（调）水控制线组成（引水是针对受水水库而言，调水是针对调水水库而言），与供水调度图使用相似，引（调）水决策是根据时段初蓄水量所处的引（调）水调度区来进行，如处于限制引（调）水区（即Ⅴ区），则按需水或线性插值引水. 需要注意的是受水水库的实际引水决策是调水水库调水决策和受水水库引水决策的一个组合决策过程[12].



(a) 供水调度图



(b) 引（调）水调度图

图 1　水库联合调度图

Fig. 1　Joint operating rule curves for reservoir

表 1　水库引（调）水与供水调度图的调度区及调度规则

Tab. 1　Operation zones and their application rules derived from water supply-transfer operating rule curves

联合调度图	调度区编号	调度区	调度规则
供水调度图	Ⅰ区	工业、农业供水保证区	工业、农业均正常供水
	Ⅱ区	工业供水保证区、农业供水破坏区	工业正常供水、农业限制供水
	Ⅲ区	工业、农业供水破坏区	工业、农业均限制供水
引（调）水调度图	Ⅳ区	不引（满调）水区	不引水（按调水能力调水）
	Ⅴ区	限制引（调）水区	按一定规则引水（调水）
	Ⅵ区	满引（不调）水区	按引水能力引水（不调水）

由于涉及多个水库和供水区间，只用调度图还不能完整地描述整个系统的调度规则，还需要相应的辅助规则来配合使用，即引水与供水分配规则和下游区间供水规则. 其中，引水与供水分配规则主要解决多库同时引水和多库同时为联合供水目标供水时的水量分配问题[13]. 下游区间供水规则解决水库下游区间用水户的供水问题，由区间用水、来水和水库供水调度图共同决定：模拟决策时先利用区间来水，再根据时段初蓄水量所处的调度区进行供水决策.

1.2　数学模型

目标函数为系统供水量最大和受水水库弃水量最小，采用权重法和罚函数形式构建数学模型，具体建模过程参见文献[13-14]，最终确定目标函数为

$$f(x)=\min\left\{-\lambda_1\cdot\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}W_{i,j,t}(x)+\lambda_2\cdot\sum_{i=1,i\notin\Omega}^{N}\sum_{t=1}^{T}S_{i,t}(x)+\sum_{j=1}^{J}\zeta_j\cdot\min\{0,P_j-P_j^{e}\}^2+\sum_{i=1}^{N}\left\{\psi\cdot\sum_{t=1}^{T}\min\{0,V_{i,t}-V_{i,t}^{\min}\}^2/N_i^{\text{deep}}\right\}\right\}\quad(1)$$

式中：x 为供水限制线和引（调）水控制线；Ω 为调水水库集合；N 为水库个数；T 为总调度时段数（$T=L\cdot Y$，L 为一个水文年划分的调度时段数，Y 为水库模拟调度总年数）；J 为相应水库用水户

个数；$W_{i,j,t}$ 为 i 水库 j 用水户 t 时段供水量；$S_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段弃水量；$V_{i,t}$、$V_{i,t}^{\min}$ 分别为 i 水库 t 时段初蓄水量和死库容；P_j、P_j^{e} 为 j 用水户的实际和设计供水保证率；λ_1、λ_2 为非归一化权重系数；ψ 为深度破坏(水库蓄水量小于死库容)惩罚系数；ζ_j 为 j 用水户的保证率惩罚系数，其中，高优先级用水户惩罚系数不小于低优先级用水户惩罚系数；N_i^{deep} 为 i 水库深度破坏次数.

2 基于改进 PSO 算法求解调度图模型

2.1 基本 PSO 算法

PSO 算法以种群作为迭代进化的基本单位，搜索空间中每个粒子都是优化问题的一个潜在解，各粒子具有自身的速度和位置，以及用于衡量粒子优劣的适应度. 在搜索过程中，粒子通过历代搜索过程中粒子的个体极值 p^{best} 和整个群体的全局极值 g^{best} 来动态更新速度和位置，直到找到最优解. 粒子 i 采用一维数组的实数编码方式，表示为 $\boldsymbol{x}_i=(x_{i,1}\quad x_{i,2}\quad\cdots\quad x_{i,d}\quad\cdots\quad x_{i,D\cdot L})$，飞行速度为 $\boldsymbol{v}_i=(v_{i,1}\quad v_{i,2}\quad\cdots\quad v_{i,d}\quad\cdots\quad v_{i,D\cdot L})$. 其中，基因位 $x_{i,d}$ 代表调度线的位置，$d=(p-1)\cdot L+l$；$p=1,2,\cdots,D$，$l=1,2,\cdots,L$；D 为调度线的总条数. 粒子和速度更新计算公式如下：

$$\boldsymbol{v}_i^{k+1}=w\cdot\boldsymbol{v}_i^k+c_1\cdot r_1\cdot(\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{best}}-\boldsymbol{x}_i^k)+c_2\cdot r_2\cdot(\boldsymbol{g}^{\mathrm{best}}-\boldsymbol{x}_i^k) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{k+1}=\boldsymbol{x}_i^k+\boldsymbol{v}_i^{k+1} \tag{3}$$

式中：$i=1,2,\cdots,M$；$k=1,2,\cdots,K$；M 为粒子群粒子个数；K 为迭代总次数；c_1 和 c_2 为学习因子；随机数 $r_1,r_2\in[0,1]$；w 为惯性系数，以权衡全局和局部寻优；$\boldsymbol{v}_i\in[-\boldsymbol{v}_i^{\max},\boldsymbol{v}_i^{\max}]$，最大速度 $\boldsymbol{v}_i^{\max}$ 决定解向量的搜索精度，一般设置为各维最大取值范围的 10%～40%.

2.2 PSO 算法改进

2.2.1 交叉和变异策略

(1)交叉策略. 依概率 P_{c} 在种群中选出 $P_{\mathrm{c}}\cdot M$ 个粒子，采用算术交叉进行两两交叉操作. 设 $\boldsymbol{x}_i$ 和 $\boldsymbol{x}_j$ 为两个父代粒子，则对其进行交叉操作的计算公式如下：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}_i&=r\cdot\boldsymbol{x}_i+(1-r)\cdot\boldsymbol{x}_j\\ \boldsymbol{x}_j&=r\cdot\boldsymbol{x}_j+(1-r)\cdot\boldsymbol{x}_i\end{aligned} \tag{4}$$

其中 $r\in(0,1)$，为随机数. 由于参与交叉的粒子 i 和 j 中同类型调度线的位置满足 $x_{i,(p-1)\cdot L+l}>x_{i,p\cdot L+l}$，$x_{j,(p-1)\cdot L+l}>x_{j,p\cdot L+l}$，而经过交叉操作后新位置 $x'_{i,(p-1)\cdot L+l}$ 和 $x'_{i,p\cdot L+l}$ 分别为

$$\begin{aligned}x'_{i,(p-1)\cdot L+l}&=r\cdot x_{i,(p-1)\cdot L+l}+(1-r)\cdot x_{j,(p-1)\cdot L+l}\\ x'_{i,p\cdot L+l}&=r\cdot x_{i,p\cdot L+l}+(1-r)\cdot x_{j,p\cdot L+l}\end{aligned} \tag{5}$$

且

$$\begin{aligned}x'_{i,(p-1)\cdot L+l}-x'_{i,p\cdot L+l}=r\cdot(x_{i,(p-1)\cdot L+l}-x_{i,p\cdot L+l})+\\(1-r)\cdot(x_{j,(p-1)\cdot L+l}-\\x_{j,p\cdot L+l})>0\end{aligned} \tag{6}$$

可见，通过算术交叉操作后，仍然可以保证同类型的调度线不发生交叉.

(2)变异策略. 依概率 P_{s} 对粒子 $\boldsymbol{x}_i$ 的每个基因位 $x_{i,d}$ 进行非均匀变异操作[15]. 新位置的确定如下：

$$x'_{i,d}=\begin{cases}x_{i,d}+\Delta(k,x_d^{\mathrm{u}}-x_{i,d}); & random(0,1)=0\\ x_{i,d}+\Delta(k,x_{i,d}-x_d^{\mathrm{l}}); & random(0,1)=1\end{cases} \tag{7}$$

$$\Delta(k,y)=y\cdot(1-r^{(1-k/K)^b}) \tag{8}$$

式中：x_d^{u}、x_d^{l} 分别为 $x_{i,d}$ 的上、下限；$y=x_d^{\mathrm{u}}-x_{i,d}$ 或者 $x_{i,d}-x_d^{\mathrm{l}}$；一般设置系统参数 $b=2$. 变异空间的确定：优先级最低调度线的变异空间为库容上限和优先级次低的调度线之间；优先级最高调度线的变异空间为优先级次高的调度线和库容下限之间；其他调度线的变异空间处于相邻调度线之间. 即保证了调度线经过变异操作后不发生交叉.

2.2.2 模拟退火策略 本文在 PSO 算法中加入模拟退火机制[6]，用温度控制函数 $T_0=\sigma\cdot T_0$($\sigma\in(0.8,1.0)$为退火系数)调整粒子的冷却温度，以 Meteopolis 规则接受由式(2)、(3)更新的粒子经过交叉和变异后的子代. Meteopolis 规则公式为

$$P=\begin{cases}1; & f(x_i')<f(x_i)\\ \exp\left[-\dfrac{f(x_i')-f(x_i)}{T_0}\right]; & f(x_i')\geqslant f(x_i)\end{cases} \tag{9}$$

其中 x_i' 为交叉或变异后的新粒子. 当新粒子适应度增加时，先由式(9)计算出接受概率 P，如果 $P>r$，则接受新粒子，否则接受原来的粒子. 随着进化过程，退火温度 T_0 逐渐减小，接受恶劣解的概率 P 逐渐趋向于 0，进行局部精细搜索，提高算法的收敛性能.

2.2.3 反射边界策略 当更新粒子位置时，为了保证新粒子的每个参数都在相应的取值范围内，将参数的最大和最小边界作为反射边界考虑在算

法中，这种反射边界策略使粒子更容易接近全局最优解[9]. 粒子位置修正公式如下：

$$x'_{i,d}=\begin{cases}x_{i,d}-2(x_{i,d}-x_d^{\mathrm{u}}); & x_{i,d}>x_d^{\mathrm{u}}\\ x_{i,d}+2(x_d^{\mathrm{l}}-x_{i,d}); & x_{i,d}<x_d^{\mathrm{l}}\end{cases} \tag{10}$$

以上两种情况下，相应的粒子速度修正为

$$v'_{i,d}=-v_{i,d} \tag{11}$$

2.3　数值测试

为了分析各个策略的贡献和验证改进 PSO (MPSO)算法的有效性，在 PSO 算法中逐步加入不同策略形成不同算法，然后对 Rosenbrock 函数和 Rastrigin 函数[15]进行仿真计算. 其中，PSO_R 算法加入反射边界策略；PSO_GA 算法加入反射边界和交叉变异策略. 以平均函数值和变差系数作为评价指标，计算结果见表 2(进化 2 500 代，运行 50 次).

表 2　非线性函数优化性能测试

Tab. 2　Optimization performance testing of nonlinear function

函数	维数	平均函数值				变差系数			
		PSO	PSO_R	PSO_GA	MPSO	PSO	PSO_R	PSO_GA	MPSO
Rosenbrock	30	19	11	38	45	1.39	1.42	0.65	0.63
	100	871	397	215	180	1.21	0.37	0.31	0.29
	200	45 509	30 672	634	208	0.84	0.41	0.19	0.09
Rastrigin	30	20	18	9	7	0.50	0.37	0.45	0.49
	100	251	209	77	66	0.15	0.12	0.17	0.19
	200	695	600	229	208	0.10	0.11	0.11	0.09

由表 2 可知，MPSO 算法的稳定性较好；交叉、变异策略对收敛性能改进作用最大，其次为模拟退火策略，再次为反射边界策略. 对 Rosenbrock 函数，在低维时收敛精度相对较差，但在高维时显著提高；对 Rastrigin 函数，在低、高维时收敛精度都显著提高. 可见，MPSO 算法用于求解高维复杂优化问题的有效性.

2.4　模型求解

采用模拟-优化方法求解模型，其中优化模块采用 MPSO 算法，粒子的适应度采用式(1)，优化变量为联合调度图的调度线，决策变量为水库时段引水量和供水量. 调度图模型的具体求解步骤见文献[13-14].

3　实例应用

以我国北方某跨流域调水工程开展实例研究，工程背景、数据资料、供水任务等情况参见文献[13-14]，系统结构概化图见图 2.

3.1　模型参数设置

设置迭代次数 $K=2\ 500$；学习因子 $c_1=c_2=2$；惯性系数 w 采用线性递减模型 $w=w_{\max}-k(w_{\max}-w_{\min})/K$，取 $w_{\max}=0.9$，$w_{\min}=0.4$；最大速度 $v^{\max}=0.4$；采用文献[6]推荐的方法设置初始温度 $T_0=10^6$，温度冷却系数 $\sigma=0.9$. 通过参数优选来确定种群大小、交叉概率和变异概率等参数.

3.1.1　种群大小优选　在 $P_c=0$、$P_s=0$ 时，种群大小设置 6 种情景：$M=50,90,120,150,180,210$. 不同种群大小的适应值进化过程均值(50 次，以下相同)如图 3 所示.

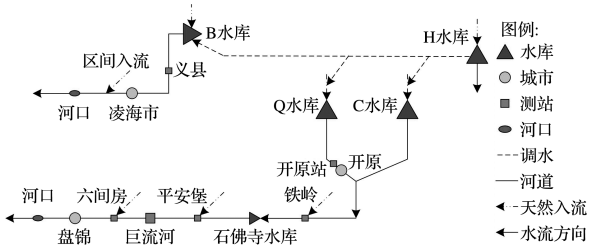


图 2　跨流域水库群供水系统结构概化图

Fig. 2　Simplified structure diagram of the inter-basin multi-reservior water supply system

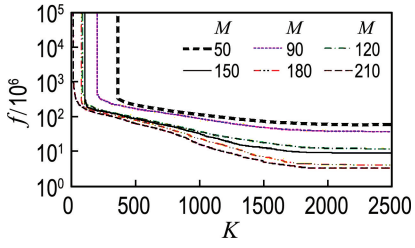


图 3　不同种群大小平均进化过程

Fig. 3　Mean evolutionary processes under different population sizes

由图 3 可见,从进化速度上,种群越大达到相同的精度时所需的代数越少;从收敛精度上,种群越大收敛精度越高,但当种群增大到一定程度时,收敛精度差别不大;最优种群大小范围为 $M \geqslant 120$. 由于模拟运行时间随种群大小近似呈线性增长,综合考虑选取种群大小 $M=120$.

3.1.2 交叉和变异概率优选 在 $P_s=0$ 时,不同交叉概率下最小和平均适应度的变化曲线如图 4 所示,随着交叉概率的增大,适应度呈现先减小后增大的趋势,最佳取值范围为 0.10～0.25,选取 $P_c=0.20$. 在 $P_c=0.20$ 时,不同变异概率下最小和平均适应度的变化曲线如图 5 所示,变异概率较小时取值较优,选取 $P_s=0.01$.

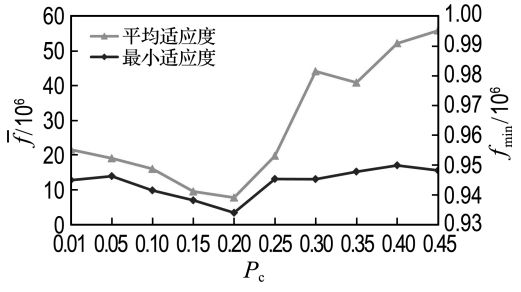


图 4 不同交叉概率下的适应度

Fig. 4 Fitness values under different crossover probabilities

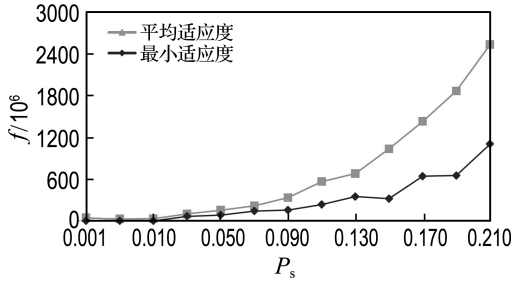


图 5 不同变异概率下的适应度

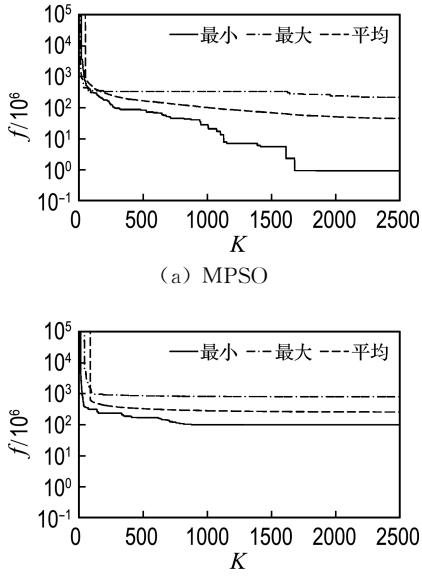
Fig. 5 Fitness values under different mutation probabilities

3.1.3 有效性分析 由于 MPSO 算法是以增加计算过程(环节)来减少"进化"代数并提高求解精度,而本文主要考虑调度问题的求解精度,所以将实例应用的适应度最大、最小、平均值和标准差以及进化过程作为度量指标,在固定迭代次数下与 PSO 算法对比进行 MPSO 算法的有效性分析. MPSO 与 PSO 算法的对比分析如表 3 和图 6 所示,可以看出 MPSO 算法的收敛性更好;适应度进化过程也反映了 MPSO 算法的收敛速度快且精度较高.

表 3 MPSO 和 PSO 算法适应度特征值对比

Tab. 3 Characteristics of fitness values comparison between MPSO and PSO algorithms

算法	适应度/10^4			
	最大值	最小值	平均值	标准差
MPSO	21 983	94	4 563	4 441
PSO	78 961	981	25 412	18 087



(a) MPSO

(b) PSO

图 6 最大、最小和平均适应度进化过程对比

Fig. 6 Comparison of evolutionary processes on the maximum, minimum and average fitness values

3.2 结果及分析

3.2.1 调度图及其合理性分析 联合调度图如图 7 所示,可以看出:

(1)供水限制线的变化趋势符合一般的调度规律

①汛前供水限制线压低,为汛期腾空库容和减少汛期的弃水;②汛期来水较丰,供水限制线较低,限制供水次数减少;③汛后供水限制线抬高,以保证汛后水库的蓄满率和枯水期的供水.

(2)引(调)水控制线的变化趋势符合调度规律

①H 水库主要任务是调水,11 月～次年 2 月其调水控制线较高,避免受水水库过度引水;其他时段为发挥调水的龙头作用,调水控制线都较低. 而受水水库的供水压力较大(尤其是 Q 水库),尽量抬高引水控制线的位置以增加引水机会.

②汛期(7～9 月上),如图 7 中区域Ⅱ所示,

H 水库的调水控制线较低，而 Q 和 C 水库的引水控制线较高，这种调水与引水组合使 Q 和 C 水库在汛期来水不足时尽量引水，以保证 Q 和 C 水库的蓄满率；而 B 水库来水量较丰且供水压力相对较小（见表 4），其引水控制线相对较低，以降低“引水且弃水”情况.

③由 9 月中旬～10 月和 1～3 月的变化趋势可知，Q、B 和 C 水库之间呈现“竞争”的趋势，三者按一定比例同时引水的机会较大.

④由图 7 中区域Ⅲ（11～12 月）和区域Ⅰ（4～6 月）的变化趋势可知，Q 水库的引水表现出与 B、C 水库“互补”的趋势，水库单独引水的机会较大. Q 水库在 11～12 月减少引水，利用自身来水和库存的水量供水，保证 B、C 水库的引水. 在 4～6 月 Q 水库需要大量引水以满足增加的供水需求，而 B、C 水库相应地减少引水；同时，H 水库为满足受水水库的引水需求和腾空自身库容降低汛期的弃水，压低调水控制线.

综上，调水水库与受水水库之间的引水与调水具有相互制约与协同关系，受水水库之间的引水具有很好的“互补”关系.

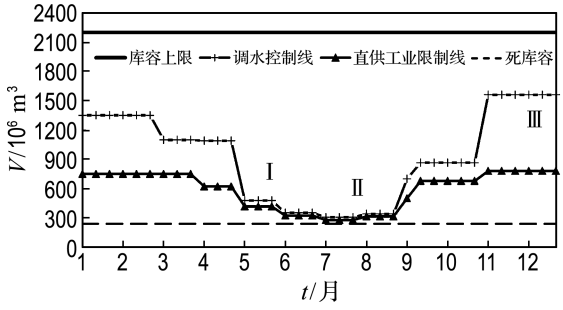
3.2.2　调度结果对比分析　将 MPSO 与 PSO 算法的调度方案进行对比分析，进一步说明 MPSO 算法调度结果的合理性. 如表 4 和 5 所示，水库群调度方案比较理想，各用水户均满足规划保证率要求.

（1）成员水库供水和弃水对比：H 水库调出水量增多同时弃水减少；Q 水库在引水量增加的同时弃水量减少，说明 MPSO 算法获得的联合优化调度图更加合理；C 水库在引水量相差不大的情况下，提高了弃水的利用率；B 水库由于引水量增加，则供水增加但弃水也增加，引水效率有待进一步提高.

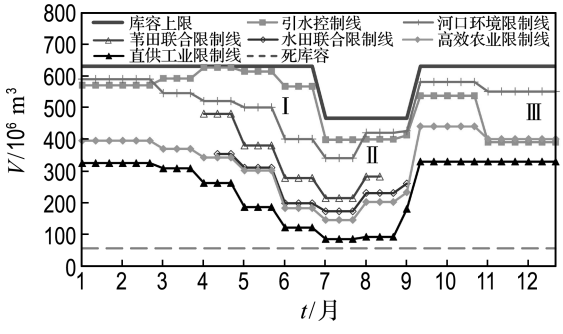
（2）系统供水和弃水对比：受水水库的实际引水增加 118×10^6 m^3，供水增加 134×10^6 m^3，弃水减少 27×10^6 m^3；整个系统供水增加 140×10^6 m^3，来源于增加的引水和其他用水户减少的供水，主要用于苇田和河口环境供水.

（3）用水户供水保证率对比：MPSO 算法中，用水户供水保证率都满足规划要求，但 PSO 算法中苇田供水保证率没有满足要求，表明 MPSO 算法的收敛性更好. 此外，由于 H 水库调水增加，其直供工业保证率降低；为增加苇田供水，Q 水库的直供工业、高效农业保证率降低.

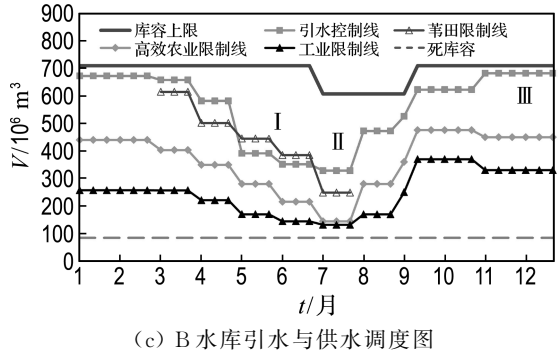
从以上分析可知，MPSO 算法获得的联合优化调度图更加合理，调水水库调出水量增多，受水水库供水相应地增加，供水分配更加平衡，提高了供水和引水效益.



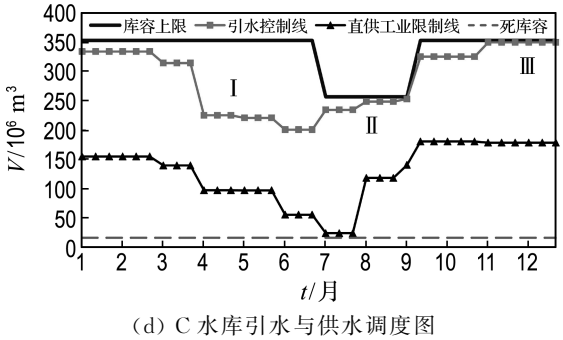
（a）H 水库调水与供水调度图



（b）Q 水库引水与供水调度图



（c）B 水库引水与供水调度图



（d）C 水库引水与供水调度图

图 7　跨流域水库群联合优化调度图

Fig. 7　Joint optimal operation rule curves of the inter-basin multi-reservoir system

表 4 水库和系统调节成果对比

Tab. 4 Comparison of operating results of reservoirs and entire system 10^6 m^3/a

	供水			引(调)水			弃水		
	MPSO	PSO	差值	MPSO	PSO	差值	MPSO	PSO	差值
H 水库	859	860	−1	1 302	1 176	126	1 554	1 615	−61
Q 水库	951	871	80	730	691	39	187	228	−41
B 水库	733	702	31	349	270	79	338	301	37
C 水库	357	334	23	188	188	0	101	124	−23
系统	4 718	4 578	140				3 386	3 540	−154

注:系统汇总除包括水库外,还包括下游区间水的利用

表 5 水库用水户保证率统计结果对比

Tab. 5 Comparison of statistical reliability rates of reservoir's water users %

算法	H 水库	Q 水库				B 水库			C 水库
	直供工业	直供工业	高效农业	水田	苇田	工业	高效农业	苇田	直供工业
MPSO	98.08	95.09	87.40	77.47	50.94	95.46	85.10	52.83	95.36
PSO	98.61	96.96	96.32	77.36	1.89	95.41	85.10	0	95.19

4 结 语

本文重点针对跨流域水库群联合调度图模型构建和求解算法进行了研究.调度图模型中考虑系统供水量最大和受水水库弃水量最小两个目标函数,可以很好地反映整个系统的供水与引水效益.引(调)水与供水调度线的变化趋势符合一般调度规律:供水限制线呈现两头高中间低的变化趋势;引水与调水之间存在制约与协同关系,以及受水水库之间引水具有一定的"互补"关系,说明调度规则能充分发挥流域之间的"水文补偿"和水库之间的"库容补偿"作用.数值实验表明交叉、变异策略对算法的改进作用较大,且适用于求解高维复杂优化问题;改进算法可以增加系统供水 134×10^6 m^3,减少弃水 27×10^6 m^3,提高了系统的水资源利用效率.

参考文献:

[1] Chang F J, Chen L, Chang L C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms [J]. **Hydrological Process**, 2005, **19**(11):2277-2289.

[2] 郭生练,陈炯宏,刘 攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, **21**(4):496-503.
GUO Sheng-lian, CHEN Jiong-hong, LIU Pan, *et al*. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. **Advances in Water Science**, 2010, **21**(4):496-503. (in Chinese)

[3] 陈卫宾,董增川,张运凤. 基于记忆梯度混合遗传算法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(6):10-13.
CHEN Wei-bin, DONG Zeng-chuan, ZHANG Yun-feng. Optimization the allocation of irrigated areas water resources based on memory gradient hybrid genetic algorithm [J]. **Transactions of the CSAE**, 2008, **24**(6):10-13. (in Chinese)

[4] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C] // **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks**. Piscataway:IEEE, 1995:1942-1948.

[5] 张 俊,程春田,廖胜利,等. 改进粒子群优化算法在水电站群优化调度中的应用研究[J]. 水利学报, 2009, **40**(4):435-441.
ZHANG Jun, CHENG Chun-tian, LIAO Sheng-li, *et al*. Application of improved particle swarm optimization algorithm to operation of hydropower station group [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2009, **40**(4):435-441. (in Chinese)

[6] Behnamian J, Fatemi Ghomi S M T. Development of a PSO-SA hybrid metaheuristic for a new comprehensive regression model to time-series forecasting [J]. **Expert Systems with Applications**, 2010, **37**(2):974-984.

[7] Tu K Y, Liang Z C. Parallel computation models of

particle swarm optimization implemented by multiple threads [J]. **Expert Systems with Applications**, 2011, **38**(5):5858-5866.

[8] Afshar M H. Large scale reservoir operation by constrained particle swarm optimization algorithms [J]. **Journal of Hydro-Environment Research**, 2012, **6**(1):75-87.

[9] Ali M M, Kaelo P. Improved particle swarm algorithms for global optimization [J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2008, **196**(2):578-593.

[10] 尹正杰,胡铁松,崔远来,等. 水库多目标供水调度规则研究[J]. 水科学进展, 2005, **16**(6):875-880.
YIN Zheng-jie, HU Tie-song, CUI Yuan-lai, *et al*. Reservoir operation rule for multipurpose water supply [J]. **Advances in Water Science**, 2005, **16**(6):875-880. (in Chinese)

[11] Tu M Y, Hsu N S, Tsai F T C, *et al*. Optimization of hedging rules for reservoir operations [J]. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2008, **134**(1):3-13.

[12] GUO Xu-ning, HU Tie-song, ZHANG Tao, *et al*. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project [J]. **Journal of Hydrology**, 2012, **424-425**:252-263.

[13] PENG An-bang, PENG Yong, ZHOU Hui-cheng, *et al*. Multi-reservoir joint operating rule in inter-basin water transfer-supply project [J]. **Science China: Technological Sciences**, 2015, **58**(1): 123-137.

[14] 彭安帮,彭　勇,周惠成. 跨流域调水条件下水库群联合调度图概化降维方法研究[J]. 水力发电学报, 2015, **34**(5):35-43.
PENG An-bang, PENG Yong, ZHOU Hui-cheng. Simplification method of deriving joint operating rule curves for multi-reservoir operation [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2015, **34**(5): 35-43. (in Chinese)

[15] ZHAO Xin-chao, GAO Xiao-shan, HU Ze-chun. Evolutionary programming based on non-uniform mutation [J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2007, **192**(1):1-11.

Optimization of joint operating rule curves for inter-basin multi-reservoir system based on modified PSO algorithm

PENG An-bang[1,2,3], PENG Yong[*3], XU Qin[1,2], LIU Hong-wei[1,2], ZHOU Hui-cheng[3]

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China;
2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the inter-basin multi-reservoir optimal operation with high-dimensional nonlinearity and dynamic characteristics, a modified particle swarm optimization (MPSO) algorithm is proposed for deriving the water supply-transfer operating rule curves. Several strategies, such as crossover and mutation, simulated annealing and reflective boundary, are introduced in the basic PSO algorithm. These strategies can keep the diversity of population, improve the convergence speed and enhance the global searching ability, so that it can avoid the prematurity and slow convergence in later evolution. Numerical tests results manifest the effectiveness of the proposed algorithm for solving high-dimensional complex optimization problems. A case study indicates that the benefit of water transfer and supply has been improved considerably by the proposed algorithm. The proposed algorithm can be an effective method for optimizing the joint operation of such complex multi-reservoir system.

Key words: inter-basin water transfer; multi-reservoir optimal operation; water transfer; water supply; modified PSO algorithm