

文章编号 0559-9350(2013)01-0026-09

基于可行空间搜索遗传算法的水库调度图优化

王旭, 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 本文从调度图概化、调度图模拟模型、目标函数以及优化算法等方面全面介绍了基于可行空间搜索遗传算法的调度图优化模型的原理及建模方法。针对调度图优化问题可行空间搜索困难的特点, 在传统遗传算法概念基础上提出了可行空间搜索的概念。根据决策变量间的几何关系, 设计了调度图优化问题的编码结构以及信息交互机制, 以NSGA-II算法为基础实现了优化模型的构建。将研究成果应用于寺坪水库调度图优化, 与设计调度图模拟结果相比, 发电效益及保证率均得到了明显提高。

关键词: 调度图优化; 调度图概化; 可行空间搜索; 遗传算法

中图分类号: TV697

文献标识码: A

1 研究背景

在水库规划调度中, 调度规则是一种直观、实用的指导水库运行的方式, 在实时调度中调度规则也是一种有效的辅助决策工具。调度图是调度规则的一种表现形式, 与调度函数相比更为简单实用、易于操作, 得到了广泛的应用。调度图制定的常规方法需要通过对典型年或典型系列的径流调节计算, 得到不同时段出库流量或出力与库水位之间的分段线性关系, 从而绘制出常规调度图, 整个过程需要结合管理者的经验。通过对调度规则的分段线性化, 调度图获得了较高的实用性, 但也在一定程度上牺牲了优化效果。同时, 基于调度图的水库调度方式没有直接考虑当前时段径流预报, 且面临正常出力区范围过大的问题, 其调度结果尚有很大的优化空间, 因此对调度图进行优化成为调度图研究发展的必然趋势。

对调度图优化方法的研究可以归为三类: (1)常规调度图制定配合人工修正; (2)基于隐随机优化算法的调度图优化方法; (3)基于调度图概化及现代启发式算法的调度图优化方法^[1]。前两种方法的共同之处是在已有调度规则基础上, 通过试算或数理统计的辅助手段得到相对较优的调度图, 过程复杂, 自动化程度低, 同时优化结果很不理想。第三种方法是结合调度概化, 采用遗传算法、粒子群算法和差分演化算法等现代启发式算法而逐渐形成一套模拟与优化相结合的基于调度图概化的直接优化方法。

基于调度图概化的直接优化方法具有操作灵活、便于应用、优化效果好的特点, 国内外学者在该领域做了大量有价值的工作。Li Chen^[2]以及Oliveira和Locks等^[3]先后将遗传算法应用于水库调度图优化中, 结合水库综合利用要求, 实现对水库调度图的制定^[4]; 张铭等人采用动态规划算法对水库调度图进行了优化; Fi-John Chang, Li Chen等^[5]采用多目标GA对Shih-Men水库调度图进行了优化, 并提出在水库调度图优化应用中实数型编码形式比二进制编码形式具有更高的计算效率和精度; 尹正杰、胡铁松等^[6]以调度图的基本调度线为决策变量, 建立了基于遗传算法的单库供水调度图优化模型; 刘攀等^[7]对遗传算法在水库调度优化中的应用做了综述, 尤其针对调度图优化问题中存在的编码及约束

收稿日期: 2012-01-08

作者简介: 王旭(1985-), 男, 辽宁营口人, 硕士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: wangxu-04@126.com

处理等问题做了详细阐述；张双虎^[8]、黄强^[9]在乌江渡水库群优化调度中，分别采用差分演化算法和遗传算法构建以梯级发电量最大为目标的模型，在给出最优化决策的同时给出了梯级总调度图及各电站的优化调度图；Li Chen等^[10]采用进化多目标遗传算法对台湾一座水库的调度曲线进行了优化；刘心愿等^[11]采用遗传算法对梯级水库群的总调度图进行了优化，并在此基础上构建了出力分配模型；邵琳等^[12]结合遗传算法与模拟退火算法的特点提出了混合模拟退火遗传算法，并应用于水库调度图优化；程春田等^[13]采用模拟逐次逼近算法对梯级水电站群调度图进行了优化，并在乌江流域梯级水电站群进行了应用，取得了满意的效果。

基于调度图概化的直接优化方法，其存在的主要问题是可行解空间非常狭窄，现有的优化算法虽然具有较好的学习能力，但是在目前普通计算机的计算能力限制下也无法在短时间内获得令人满意的优化解。针对这一问题的解决方法，无论是通过对问题的简化还是对优化算法的改进，均在一定程度上牺牲了优化效果，最终只是在优化效率和优化效果的平衡之间做出了取舍。

因此，本文提出了一套基于可行空间搜索遗传算法的调度图优化模型(Reservoir Operation Chart Optimization Model using Feasible Range Searching Technique based on Genetic Algorithm)，简称为ROCOM-FRSGA(下文为叙述方便，均采用该简称)。该模型以模拟与优化相结合的理论为基础，结合水库调度图概化和基于调度图的水库调度模拟模型，采用基于可行空间搜索遗传算法对水库调度图进行优化。

2 ROCOM-FRSGA 模型理论方法

ROCOM-FRSGA 模型理论基本框架如图1所示，其中包括三大关键模块：(1)调度图概化；(2)水库模拟模型(RESSIM)及优化目标函数的确定；(3)基于可行空间搜索遗传算法(FRSGA)。



图1 ROCOM-FRSGA 模型框架

首先，对调度图进行概化，并通过参数及变量来定义水库调度图。然后，将变量作为FRSGA模型的决策变量。遗传算法中每一代种群中的每个个体代表一个水库调度图，将该调度图传入RESSIM模型进行调度过程模拟，并根据设定的目标函数计算每个个体的适应度，遗传算法通过不断杂交、变异进行逐代进化，直到满足收敛条件，逼近全局最优解。对单目标优化来说，可以得到一个最优调度图及相应的水库调度过程；而对于多目标问题来说，则可得到一组最优解(非支配解)，即Pareto前沿，决策者可以根据不同的偏好选取不同的最优解。

2.1 调度图概化 通常对调度图的概化分为两种方式：(1)逐时段纯水位的概化方式；(2)时间、水位组合的拐点式混合概化方式。

第一种概化方式，优势在于模型简单便于优化求解，缺点在于决策变量多，同时生成的调度图线型混乱，需要人工修正，方能应用于实际。正是这种先天不足的缺陷严重制约了调度图优化的效果，无法实现对水库的最优化调度。

第二种概化方式能够极大减少决策变量个数，降低优化规模，但同时决策变量维数增加，由单纯水位的一维实数变量组转变为时间、水位组合拐点式的二维整形、实数混合变量组，使得优化问题的可行域变得更加狭窄，提高了最优解的搜索难度。变量少、优化结果无需修正可直接应用的特点是混合概化方式的主要优势，为提高优化模型效率及寻找全局最优解奠定了基础。因此，只要解决最优解搜索困难的问题，便能提高调度图的优化效率和效果。

混合概化方式模型优化的难点是要保证调度线各拐点之间的二维拓扑关系，例如在图2中要保证：(1)每条调度线 t 时刻水位要小于上调度线 t 时刻水位，即保证拐点A水位值低于上调度线同时刻水位值，同时任意两拐点A、B之间的连线不能与上调度线相交或者理解为要保证点C在AB线段之上；(2)同一条调度线上拐点之间根据调度线的特点确定关系，如图2所示：F点的时间 t 和水位 Z 均高于E点的时间 t 和水位 Z 。

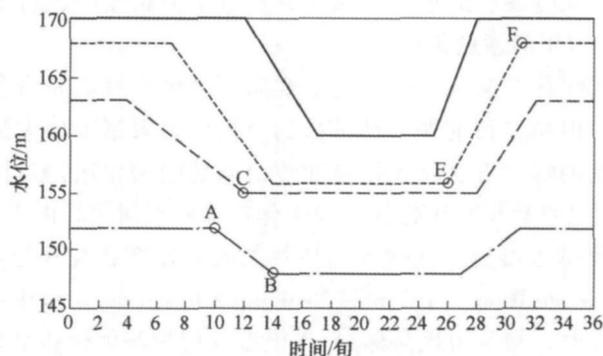


图2 基于时间、水位组合的拐点式混合概化方式的调度

为了解决混合概化方式模型可行空间狭窄的问题，本文提出了FRSGA算法。并以此为基础开发了调度图优化模型ROCOM-FRSGA。此外，为了便于比较研究，该模型也实现了基于逐时段纯水位概化方式的调度图优化。

2.2 基于调度图的水库调度模拟模型 基于调度图的水库调度模型是以调度图为决策依据、以水库工程参数为约束边界，进行逐时段的调度模拟。作为模型核心的调度图，可以采用水库的设计调度图，也可采用优化算法得到的调度图。

水库调度模拟模型约束还包括水库水量平衡约束、库容上下限约束、出力上下限约束以及出流量上下限约束。在考虑供水的情况下还包括供水约束。

(1)水库水量平衡约束：
$$V_{t+1} = V_t + (Q_{inf,t} - Q_t)\Delta t \quad (1)$$

式中： V_t 、 V_{t+1} 分别为水库 t 时段初、末库容，百万 m^3 ； $Q_{inf,t}$ 为水库 t 时段入流， m^3/s ； Q_t 为水库 t 时段出库流量， m^3/s ，包括发电流量、供水流量、弃水流量等。

(2)水位约束：
$$Z_{t,min} \leq Z_t \leq Z_{t,max} \quad (2)$$

式中： $Z_{t,max}$ 、 $Z_{t,min}$ 分别为水库 t 时段水位上限、下限值， m ； Z_t 为水库 t 时段水位值， m 。

(3)流量约束：
$$Q_{t,min} \leq Q_t \leq Q_{t,max} \quad (3)$$

式中： $Q_{t,max}$ 、 $Q_{t,min}$ 分别为水库 t 时段最大、最小允许出库流量， m^3/s ； Q_t 为水库 t 时段出库流量， m^3/s 。

(4)出力约束：
$$N_t \leq N_{t,max} \quad (4)$$

式中： $N_{t,max}$ 为水库 t 时段的最大出力， kW ； N_t 为水库 t 时段出力， kW 。

(5)水位库容关系曲线：
$$Z_t = f(V_t) \text{ and } V_t = f(Z_t) \quad (5)$$

式中符号所表示的意义与前文一致

(6)尾水位流量关系曲线：
$$Q_t = f(Z_{dr,t}) \text{ and } Z_{dr,t} = f(Q_t) \quad (6)$$

式中： $Z_{dr,t}$ 表示水库 t 时段尾水位， m 。

(7)供水约束：
$$W_{i,s,t} \leq W_{i,d,t} \quad (7)$$

式中： $W_{i,s,t}$ 、 $W_{i,d,t}$ 分别为需水单元 i 在 t 时段的水库供水量及需水量，百万 m^3 。

2.3 基于可行空间搜索遗传算法FRSGA 调度图优化问题是典型的约束优化问题，根据约束优化问题的数学定义，调度图优化问题的目标函数可认为是由调度图模拟模块与结果统计模块组成的，而约束条件就是调度图自身所反映的线与线、点与点之间的相互制约关系。这种制约关系很难采用表达式的方式进行描述，因此增大了罚函数法等通用方法的求解难度。同时，调度线之间的相对关系

构成了一种强约束，采用传统遗传算法求解，会产生大量不可行解，原因在于在传统遗传算法的体系下，调度图优化问题的解的可行域占搜索域的比重极小，导致优化过程中必须浪费大量的计算能力在不可行解的生成和处理上，而没有真正用于搜索最优解。

如何应用遗传算法有效地解决水库优化调度问题乃至水资源优化调度问题，国内外学者做了大量工作^[14-16]。由于传统遗传算法自身的局限性导致研究工作最终聚焦于一个根本矛盾：如果减少变量，可以提高遗传算法的优化效率，但是优化问题的可行空间的不规则性加剧，导致算法无法找到可行解；而如果增大变量规模，虽然能够更好的降低可行空间的不规则性，但是变量的增多会增大遗传算法的负担，降低优化效果。同时，没有一种通用的概念与方法能够有效地解决具有大规模约束群、可行域非常狭窄的优化问题，基于此本文提出可行空间搜索的优化概念，并应用于水库调度图优化问题，取得了较好的效果。

2.3.1 基于可行空间搜索的优化概念 传统遗传算法将问题的决策变量抽象为一组相互独立基因，这样一种方式适合于决策变量的实际意义明确且相关性小的简单问题，例如理论研究中的数学问题。但在实际应用中面对的往往是决策变量之间高度相关的复杂问题，在进化过程中，变量的可行域会随着其他相关变量取值的确定发生改变，因此传统的变量抽象方式已经无法满足需求。

FRSGA 算法将问题的抽象分为3个层面：碱基、基因、基因组，其中决策变量抽象为最基本的碱基，决策变量之间的组合与协同可以实现基因和基因组的功能。根据问题的不同，基因组可以包括一个或多个基因，基因也可以包括一个或多个碱基。在这种抽象概念的基础上，FRSGA 算法构建了信息交互机制，使得进化过程中不同层面间、各层面内部可以进行有效的信息共享。在计算中以碱基变量为基本单元逐个进化，当一个碱基进化完毕，其信息进入交互机制，从而影响下一个碱基的进化空间和方向。同理基因、基因组进化完毕后会通过信息交互机制影响下一组基因、基因组的进化空间和方向。根据问题的不同来构建特定的信息交互机制，通过分析优化问题约束群的特征，量化各决策变量之间的制约关系，利用几何学、数学方法实现对变量可行域的有效控制，保证优化模型在可行域内搜索最优解。

以调度图优化为例，根据调度图混合概化方式的特点，染色体设计方式如图3所示。以图2显示的调度图为基础，以汛限水位、死水位为边界条件，待优化调度线有3条，每条调度线作为一个基因组，每条线拐点数为 p 、 n 、 m ，各调度线的拐点作为一个基因，拐点的 t 、 Z 坐标作为一个碱基。坐标、拐点、调度线之间通过信息交互机制进行信息共享，保证在初始种群生成以及进化过程中每个个体均在可行域之内。

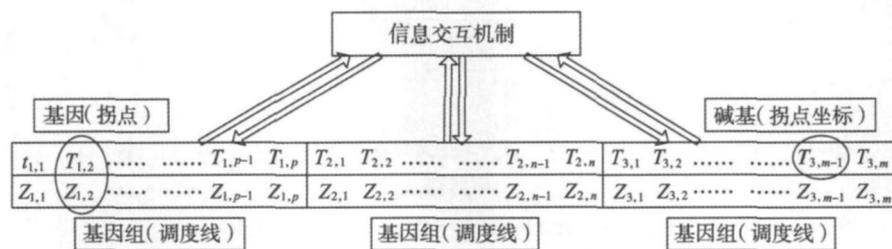


图3 基于可行空间搜索的优化概念染色体个体结构

2.3.2 可行空间搜索方法设计 在遗传算法的初始种群生成以及进化过程中，变量抽样空间的上下限通常为固定值。而对于大多数实际问题来说，决策变量之间都存在一定的相关关系，这种固定抽样空间的方式会导致优化过程中产生大量不可行解，极大的浪费了搜索效率。

在调度图优化问题中，决策变量之间存在二维拓扑关系，各变量之间存在着相互制约的特性，正如前文所述，当在随机抽样或进化过程中生成子个体调度图的某一个拐点时，下一个抽样点的搜索空间将发生变化，根据调度图各调度线之间的关系，每一个抽样点可根据其控制点将自身搜索的范围限制在可行空间之内，以达到提高搜索效率和全局优化能力的效果。

由混合拐点式的概化方式，调度图在模型中定义为一组时间变量和水位变量的集合，分别对应着调度图中各调度线的拐点的 t 、 z 坐标。对于变量组合生成的所要优化的 n 条调度线，各调度线之间必须满足相应的上下关系，在初始种群生成以及进化的过程中每一个调度图个体的各调度线之间必须满足这种二维空间关系方能成一个可行解。

为了保证这种二维关系的可行性，必须保证每个调度图个体的拐点之间满足如下两点关系：(1) 每一个待优化拐点的水位变量值必须小于其对应的上调度线同一时刻的控制点的水位值，这一控制点可能是上调度线需要优化的拐点，也可能是由上调度线拐点插值生成的控制点；(2) 在满足条件(1)的同时必须保证相邻的两条调度线之间不相交。这一条件的控制是调度图混合拐点概化方式模型优化的难点，本文提出射线搜索法能够有效地解决这一问题。其基本原理是通过已抽样点与上调度线相关拐点来控制当前抽样点水位变量的搜索空间之间，已抽样点与待抽样点可构成一条线段，只要根据横坐标时间 t 判断两点间的上调度线中的下凹拐点在线段之上，即保证了待抽样点是可行点。

基本步骤如下。

(1) 调度线由上至下，时间由小至大顺次抽样或变异。首先对当前调度线各拐点横坐标 t 进行抽样(整形变量抽样方法不再详述)。然后，按时间顺序对待抽样点 i 的纵坐标 Z_i 进行抽样。图4给出 i 点横坐标 t_i 三种可能性，对应着 $t_{i,1}$ 、 $t_{i,2}$ 、 $t_{i,3}$ 。此时 $i-1$ 点即为已抽样点(见图4)。根据 $t_{i,1}$ 和 t_i 确定上调度线有效拐点，如图4所示，当取 $t_{i,1}$ 、 $t_{i,2}$ 时只有控制点 C_1 ，而当取 $t_{i,3}$ 时控制点 C_1 、 C_2 均为有效拐点，并画经过点 $i-1$ 和有效拐点的射线，过 C_1 为射线 l_1 ，过 C_2 为射线 l_2 。

(2) 用过点 $(t_i, 0)$ 垂直 t 轴的线分别与射线(l_1 或 l_2)和上调度线截点，得到一组交叉控制点，如图4中圆点1-7。

(3) 取交叉控制点最小 Z 值作为待抽样点 i 纵坐标(水位) Z_i 控制上限 $Z_{i,max}$ 。在 $t_{i,1}$ 情况下，交叉控制点有点1、2，取最小 $Z_{i,max}=Z_2$ ，下限 $Z_{i,min}$ 由死水位和当前调度线最小水位变量控制(图4中有 $Z_{i,min}=Z_{i-1}$)。

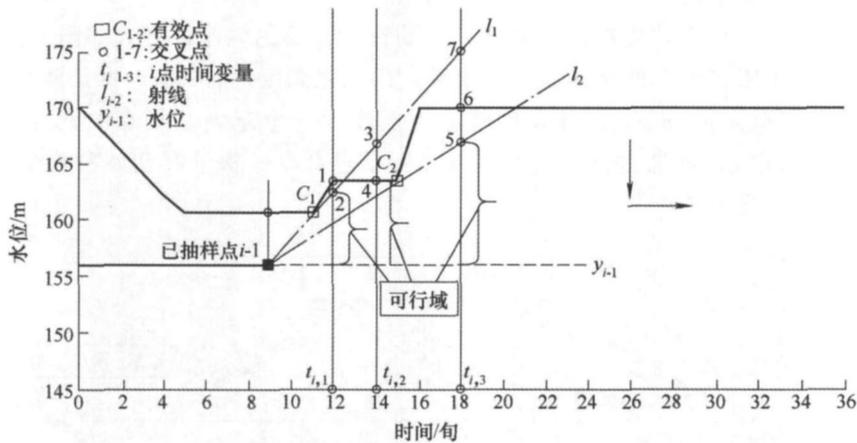


图4 ROCOM-FRSGA模型可行空间搜索方法设计

(4) 根据 $Z_{i,max}$ 、 $Z_{i,min}$ 划定的抽样空间随机取值得到 Z_i 。

2.3.3 结合可行空间搜索的遗传算法 决定遗传算法搜索效率的关键有两个方面：(1) 保证初始种群在可行域中进行抽样；(2) 保证交叉变异过程控制在可行域范围内。遗传算法在初始种群抽样以及进化过程中均采用这种可行空间搜索方法，但是在不同的情况下实现的方式略有不同。下文将以NSGA-II算法为例详述在ROCOM-FRSGA模型的实现方式。

NSGA-II是目前公认的多目标优化效果最好的算法之一。该法采用快速非支配分层排序和排挤机制，并引入精英保留策略，能够保证解的多样性，使解更广泛均匀的逼近Pareto最优前沿。算法较成熟、稳健，无论对于理论测试函数，还是实际生产问题，均表现出较强的寻优能力。算法不需要对多个目标进行协调，直接搜索非劣解集，并且提供混合编码方式，通用性和可扩展性较强。

(1)NSGA-II 算法的实现形式：①初始种群的生成：首先生成随机数 m_i ，参数上下限设置为 X_{\min} 、 X_{\max} ，初始种群个体 i 由式(1)生成：

$$X_i = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \times m_i \quad (8)$$

②交叉变异方法：首先优选父代，采用轮盘赌的方式生成子代个体，再根据参数上下限 X_{\min} 、 X_{\max} 进行判断控制参数的进化区间。

(2)在NSGA-II 算法的基础上结合可行空间搜索方法实现FRS-NSGA-II：①初始种群的生成：调度线由上至下抽样，首先对时间变量进行抽样：根据每条线的拐点数 n 将时段 m 分成 $n+1$ 盒子，初始值为 1，再将剩下 $m-(n+1)$ 个时段随机插入 $n+1$ 个盒子中。再逐段累加得到 n 个点的时间值。然后逐点对水位变量进行抽样。根据可行空间搜索技术得到当前抽样点的控制点，进而取得当前抽样点的水位变量的可行搜索空间，采用NSGA-II 算法初始种群的抽样方式实现对抽样点决策变量的抽样；②交叉变异过程：调度图优化问题中，时间参数变量的控制范围比较狭窄，以旬为例：1-36。采用NSGA-II 交叉变异算子必然使得大部分情况下在可行域之外，考虑到水库调度图的特点，调度线拐点之间的制约使得时间点的变化空间很小，因此将变化量概化为 0, 1, -1，变化概率各占 1/3。从而实现一种简化轮盘赌的随机抽样方式。

水位参数首先采用NSGA-II 算法交叉变异的方式进化，然后根据可行空间搜索技术判断各点的水位变量可行空间，逐点进行修正。

2.3.4 目标函数 以年均发电量、供水量、发电保证率以及供水保证率最大化为目标，建立水库发电调度图优化模型。

优化目标函数：

$$\begin{cases} \max E = \sum_{t=1}^T KQ_t H_t \Delta t \\ \max W = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M W_{i,s,t} \Delta t \\ \max P_N = \frac{\sum_{t=1}^T 1\$(N_t \geq N_{pro})}{T} \times 100\%, t = 1, 2, \dots, T \\ \max P_W = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M 1\$(W_{i,t} \geq W_{i,pro})}{T} \times 100\%, t = 1, 2, \dots, T, i = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (9)$$

式中： T 为总计算时段数； M 为需水单元个数； K 为水库发电系数； $H_t(m)$ 为水库在 t 时段的发电水头； $N_{pro}(kW)$ 通常为水库的保证出力， $W_{i,s,min}$ (百万 m^3)为需水单元 i 防破坏保证供水量； $1\$(N_t \geq N_{pro})$ 表示水库出力大于保证出力时取值为 1，则 $\sum_{t=1}^T 1\$(N_t \geq N_{pro})$ 表示水库出力大于保证出力的时段数； $\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M 1\$(W_{i,t} \geq W_{i,pro})$ 表示单元供水大于保证需水的时段数； E (亿 $kW \cdot h$)表示调度期内水库总发电量； W (百万 m^3)表示调度期内水库总供水量； $P_N(\%)$ 表示调度期内水库发电保证率， $P_w(\%)$ 表示调度期内需水单元的供水保证率。

在实际优化过程中，目标函数可根据问题的需要删减或者增加，以保证模型优化结果满足决策者对供水发电之间优先级的要求。

3 寺坪水库调度图优化应用及结果分析

3.1 调度图优化模型初始参数设置 根据图 5(a)给出的寺坪水库设计调度图，设置优化调度图每条调度线上有 4 个拐点，拐点 1 和拐点 4 的水位一致，拐点 2 和拐点 3 的水位一致，加上出力变量共 20 个决策变量，如图 5(b)所示。设置遗传算法迭代 50 次计算，每代 200 个个体，变异系数为 0.1，交叉系数为 0.9。同时，由于寺坪水库没有供水任务，本次优化只选取了年平均发电量最大和发电保证率最大两个目标。

3.2 调度图优化结果对比分析

3.2.1 多目标分析及方案推荐 图 6 为调度图多目标优化模型得到的年平均发电量最大和发电保证率

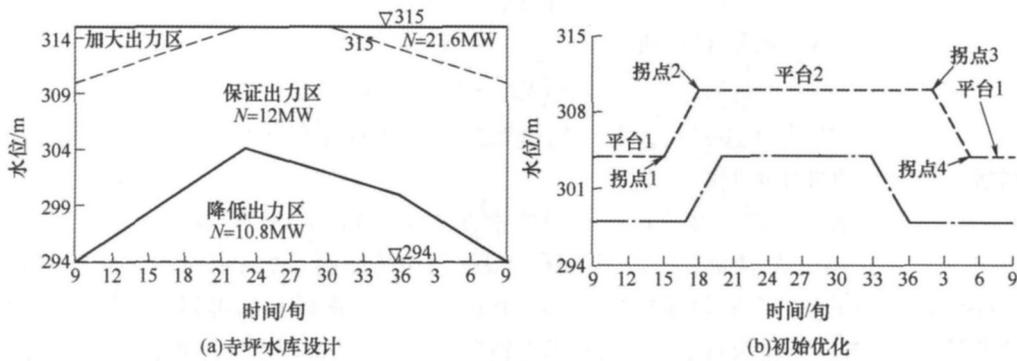


图5 寺坪水库设计调度图及初始优化调度

最大两目标的 Pareto 前沿。从图中可以看出两个目标之间是相互博弈的，追求发电量最大必然要损失发电保证率，反之亦然，因此 Pareto 前沿曲线向右下方倾斜。将设计调度图的两个目标函数值也绘制在图上，可以看出设计调度图对应的设计点被优化点构成的 Pareto 前沿所支配。

根据上述 Pareto 前沿的分布情况，挑选若干优化解进行对比分析(如表1所示)。从表1可以看到，优化解1的发电量比设计调度图要高出2930万kW·h，增发率达到了21.86%，发电保证率降低到83.43%，而优化解6的发电量比设计调度图降低了12.68%，发电保证率提高到98.05%。而优化解5为设计调度图模拟解的支配解，因此作为推荐方案，详细对比结果如表2所示，其中发电量增加了788万kW·h，增发率达到了5.88%，发电保证率提高到97.13%，提高了0.19个百分点，平均发电流量比原来增加了1.16m³/s，增加率达到4.85%，弃水量减少了0.37亿m³，减少22.98%，运行效果比设计调度图的好。

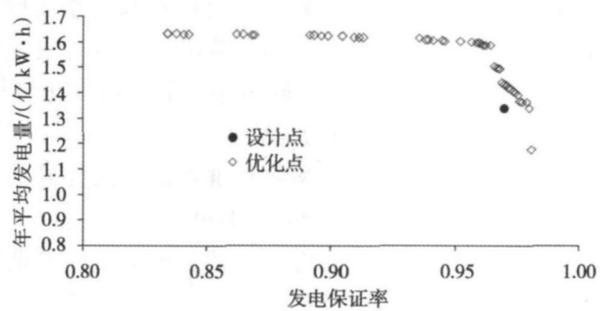


图6 目标函数的 Pareto 前沿

表1 支配设计调度图的优化解

	发电量	发电保证率
设计调度图	1.340 2	96.94
优化解1	1.633 2	83.43
优化解2	1.616 0	95.65
优化解3	1.588 4	96.20
优化解4	1.499 3	96.67
优化解5	1.418 9	97.13
优化解6	1.176 2	98.05

注：发电量(亿kW·h)，发电保证率(%)。

表2 设计调度图与优化调度图结果的对比

对比指标	设计调度图		优化调度图	
	数值	数值	变化量	变化率/%
发电量	1.340 2	1.418 9	0.078 8	5.88
发电保证率	96.94	97.13	0.19	0.19
平均发电流量	23.94	25.1	1.16	4.85
弃水量	1.6	1.23	-0.37	-22.98

注：发电量(亿kW·h)；发电保证率(%)；均发电流量(m³/s)；弃水量(亿m³)。

3.2.2 推荐方案的优化调度图及优化效率分析 图7为优化调度图，与设计调度图进行对比可以看出在枯水期优化调度图提高了保证出力区、降低出力区的范围，缩小了加大出力区的范围，而相反在丰水期8-11月期间，增加了加大出力区，减小了保证出力区、降低出力区的范围；同时可以发现，加大出力区的出力增大，而降低出力区的出力相应减小，从而提高了枯水期发电过程的平稳性以及丰水期水资源的利用效率。

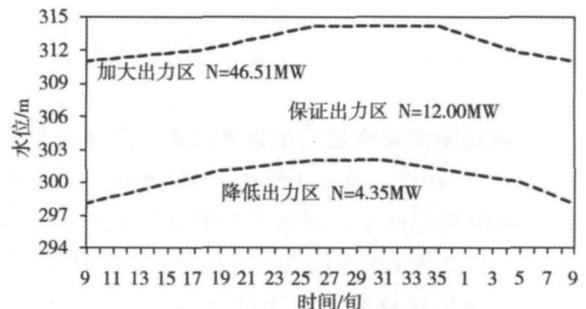


图7 寺坪水库优化调度图

4 结论与展望

为了解决调度图优化中可行空间搜索困难问题,ROCOM-FRSGA模型在传统遗传算法概念基础上构建了基于碱基、基因、基因组三层结构的抽象方式,进而提出了FRSGA算法。根据调度图优化问题的特点引入几何概念,利用线段、射线和点的几何特征设计了调度图优化问题的编码结构以及信息交互机制,在NSGA-II算法基础上实现了FRS-NSGA-II算法。结合调度图概化、调度图模拟模型以及目标函数的选取,实现ROCOM-FRSGA模型对调度图优化问题基于可行空间搜索的优化。该模型一方面大大缩减了决策变量的数量,同时有效利用变量之间的信息交互实现了基于可行空间的搜索方式,从而提高了调度图优化问题的计算效率和效果。尽管如此,调度图优化研究领域仍存在很多需要解决的问题和突破的难点,本文以ROCOM-FRSGA模型为基础提出对未来研究的展望:(1)从数学论证的角度进行理论突破。针对水库优化调度问题,国外学者已经开始尝试从数学推导的层面进行理论研究^[17-18]。而本文虽然提出了可行空间搜索概念并针对调度图优化问题设计了基于可行空间搜索的改进遗传算法,但是缺乏理论层面的支持,针对不同问题如何有效的结合这一概念来设计可行的算法,需要从数学层面给出基本的判断及一套通用的技术手段;(2)从应用角度出发提高模型的实用性。一方面通过采用并行计算技术,实现计算机计算能力的高效利用,提高模型计算速度和全局搜索能力。同时,引进数据库技术,实现对输入、输出数据的有效管理。在此基础上构建优化调度图编制平台,使模型的使用更加实用化、简单化。在实际水库调度中,梯级水库的联合优化才是决策者真正关心的问题^[8-9,12-13]。尤其在大流域的梯级水库联合调度中,涉及到的水库多达上百座,决策变量数目可想而知,因此如何将调度图优化技术有效拓展到梯级水库调度中也是应用层面的需要突破的难题;(3)细化决策指标,考虑来水预报及其不确定性。传统调度图仅以水位作为决策变量,无法有效地利用径流预报信息,使得优化调度图的效益大打折扣。而来水预报及其不确定性是影响水库优化调度的关键因素^[19],如何打破调度图这种形式本身的局限性,引入来水预报及不确定性分析等技术方法来提高调度图优化的实用性也成为未来研究的重点。

参 考 文 献:

- [1] 王旭,庞金城,雷晓辉,等. 水库调度图优化方法研究评述[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(5):71-75.
- [2] Chen L. A study of optimizing the rule curve of reservoir using object oriented genetic algorithms. PhD dissertation [D]. Department of Agricultural Engineering, National Taiwan University, Taipei, 1995.
- [3] Oliveira R, Locks D P. Operating rules for multireservoir systems[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 839-852.
- [4] 张铭,王丽萍,安有贵,等. 水库调度图优化研究[J]. 武汉大学学报,2004,37(3):5-7.
- [5] Chang F J, Chen L, Chang L C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms[J]. Hydrological Processes, 2005, 19: 2277-2289.
- [6] 尹正杰,胡铁松,吴运卿,等. 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.
- [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, 26(4):78-83.
- [8] 张双虎,黄强,黄文政,等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定[J]. 西安理工大学报, 2006, 3(22), 229-233.
- [9] 黄强,张洪波,原文林,等. 基于模拟差分演化算法的梯级水库优化调度图研究[J]. 西安理工大学学报, 2008, 6(27), 13-17.
- [10] Chen L, Mcphee J, Yeh W W G. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir curves[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(5):1082-1093.

- [11] 刘心愿,郭生练,刘攀,等.基于总出力调度图与出力分配模型的梯级水电站优化调度规则研究[J].水力发电学报,2009,6(3):26-31.
- [12] 邵琳,王丽萍,黄海涛,等.梯级水电站调度图优化的混合模拟退火遗传算法[J].人民长江,2010,41(3):34-37.
- [13] 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,2010,6(29):71-77.
- [14] 王大刚,程春田,李敏.基于遗传算法的水电站优化调度研究[J].华北水利水电学院学报,2001,22(1):5-10.
- [15] 赵建世.基于复杂适应理论的水资源优化配置整体模型研究[D].北京:清华大学,2003.
- [16] Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach [J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(6):667-676.
- [17] Jiing-Yun You, Ximing Cai. Hedging rule for reservoir operations :1. A theoretical analysis[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 :wo1415.
- [18] Jiing-Yun You, Ximing Cai. Hedging rule for reservoir operations :2. A numerical model[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 :wo1416.
- [19] 唐国磊,周惠成,李宁宁,等.一种考虑径流预报及其不确定性的水库优化调度模型[J].水利学报,2011,42(6):641-656.

Reservoir operation chart optimization searching in feasible region based on Genetic Algorithms

WANG Xu, LEI Xiao-hui, JIANG Yun-zhong, WANG Hao

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract : The theory and modeling method for reservoir operation chart optimization using feasible range searching technique based on Genetic Algorithm is introduced from several aspects, including operation chart generalization, simulation model, objective function and optimization algorithm. In order to improve the search efficiency of feasible solutions in the optimization of operation chart, feasible range searching technique based on Genetic Algorithm is proposed in the model. Considering the geometric relevance among decision variables, the special encoding structure and information interaction mechanism of operation chart optimization is designed. Finally, the optimization model is structured based on NSGA-II algorithm. In the case of optimization operation in Siping Reservoir, the generated energy and energy reliability were all enhanced comparing with the simulated results of designed operation chart.

Key words : operating chart optimization ; operating chart generalization ; feasible range searching ; genetic algorithms

(责任编辑:王成丽)