

遗传算法在水库调度中的应用综述

刘攀, 郭生练, 李玮, 易松松

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 简要回顾了遗传算法在水库调度中的应用概况, 对遗传算法用于水库调度优化时的编码、约束条件处理、早熟与全局收敛性、参数设置、混合遗传算法、多目标遗传算法以及效率评定准则等问题进行了综述。分析遗传算法耗时与全局收敛之间的矛盾后认为, 遗传算法适用于传统方法难以求解的优化问题, 以及对计算时效性要求不高或者目标函数计算复杂度不高的实时水库调度问题, 特别是水库中长期调度以及水资源规划问题。

关键词: 水库调度; 遗传算法; 综述

中图分类号: TV697.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2006)04-0078-06

A review of application of genetic algorithm to reservoir operation/LIU Pan, GUO Sheng-lian, LI Wei, YI Song-song(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: With regard to some problems in application of the genetic algorithm to optimal operation of reservoirs, including coding, treatment of restraint conditions, prematurity and global convergence, parameter setting, hybrid genetic algorithm, multi-objective genetic algorithm, and criterion for efficiency evaluation, some special methods were reviewed and discussed. Based on an analysis of the contradiction between time consumption and global convergence, it is considered that the genetic algorithm is much more suitable for the optimization problem difficult to be solved by the conventional method, and the real-time reservoir operation problem with low requirement for time-effectiveness of calculation and low complexity in objective function calculation. Moreover, the genetic algorithm is especially suitable for middle- and long-term reservoir operation and planning for water resources.

Key words: reservoir operation; genetic algorithm; review

水库调度技术传统而复杂,20 世纪 50 年代以来,以线性规划、动态规划等为代表的优化方法在水库调度中得到了广泛的应用,几十年的应用表明,这些传统的优化方法都存在一定的局限性^[1-2]。遗传算法(genetic algorithm)是一种基于模拟自然基因和自然选择机制的寻优方法,该方法按照“择优汰劣”的法则,将适者生存与自然界基因变异、繁衍等规律相结合,采用随机搜索,以种群为单位,根据个体的适应度进行选择、交叉及变异等操作,最终可达到收敛于全局最优解的目的^[3]。遗传算法主要特点有^[4]:①适应性强;②全局优化;③编码特征;④概率搜索;⑤隐含并行性;⑥自适应性;⑦算法简单,通用性好;⑧应用广泛等。鉴于这些特点,遗传算法在水库(群)优化调度(寻求最优调度轨迹)^[5-29]、水电厂经济运行^[30-35]、水火电混合系统经济调度^[36-37]、水库调度规则^[38-51]等领域中得到了广泛的应用,给现

代水库调度技术注入了活力与生机。

1 用于水库调度的遗传算法设计问题

1.1 编码策略

在设计遗传算法时,可通过编码实现从优化变量到染色体个体的映射。编码策略直接影响到计算精度与所需时间,需结合具体问题进行编码。一般地,编码可遵循以下原则:

a. 在优化实数变量时,尽量采用浮点编码。遗传算法的编码一般可以分为二进制编码、格雷编码、整数编码、浮点编码以及混合编码等。其中二进制编码概念清晰,但离散数目一定是 $2^n - 1$ 个,即离散数目呈倍数增长,因而难于选择恰当的离散数目:离散数目太多则搜索空间太大,太少则达不到精度要求^[39],因此往往存在编码冗余问题^[10];整数编码无需转化成二进制,但与二进制编码一样,仍需将优化

变量按一定步长进行离散;浮点编码可直接表征优化变量,计算精度高。在预设调度规则的水库防洪优化调度中,为了优化调度规则中的4个参数,分别采用浮点编码和二进制编码设计遗传算法,经比较防洪效益均值和方差,得出了浮点编码优于二进制编码的结论,其原因在于:①浮点编码可直接反映变量,映射实数空间的任意实数,而二进制编码等则受编码长度限制,计算精度往往不及浮点编码高;②基于浮点编码的遗传算法实际上利用了目标的梯度信息,因而收敛速度快^[39]。在四水库群的优化调度计算中,通过比较分析,得出了浮点编码优于二进制编码和格雷编码的结论^[8]。类似的研究表明,在水库优化调度计算中,整数编码要优于二进制编码,主要原因是:①二进制编码容易扩大搜索空间;②将二进制转换成整数时浪费了计算时间^[12]。

对于优化变量是实数的问题,一般可选择浮点编码;如果采用二进制编码或整数编码,则需要权衡计算精度和计算复杂度(时间)之间的关系,选择合适的染色体长度。对于0-1规划或者整数规划,仍需采用二进制编码或整数编码。此外,借助于基因显性机制的二倍体遗传算法,可利用二倍体基因结构具有内在的保护群体基因多样性的能力,提高算法的全局寻优能力^[7]。

b. 优化变量最少原则。优化变量越少,则计算搜索空间越小,算法也就越容易收敛。遗传算法的优化变量既可是整数,也可非整数实数,还可两者皆有(混合规划)。实际应用中编码有较大的技巧性,可根据具体问题的特点,选择合适的编码方式来简化问题,即通过减少优化变量数来降低问题的复杂程度。

在水库调度线优化中,可采用两种方法进行编码:①每个时段(旬)采用一个实数来代表该时段的调度线特征值(图1);②预设调度线的形状,通过遗传算法确定关键点的参数(图2)^[47]。在实例研究中,时段长度为旬,方法①的优化变量多达36个,而方法②中,如果汛期只有一个分段,则仅需确定A~D点的坐标,因此仅有8个优化变量,其中还有4个

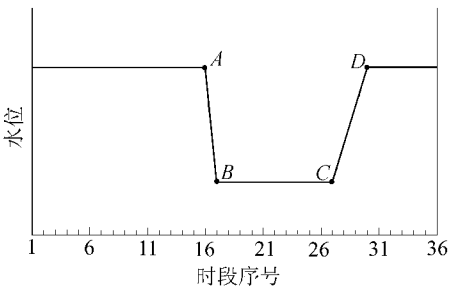


图2 采用关键点表示调度线

是整数。此外,方法②避免了水位的波动,较为符合实际情况,也便于实际操作。计算结果表明,按照方法②进行编码明显优于方法①。Chen^[43]在水库长期调度中,虽然采用图2的形式预定义调度线形状,但A~D点的横坐标均采用浮点编码而不是整数编码,增大了搜索空间,可能造成编码冗余。Huang等^[51]在水库干旱预警系统中采用方法②得到了较好的计算结果。

在三峡水库围堰发电期泄洪闸门优化调度问题中,由于相同类型的闸门有很多,因此对各泄洪闸门(全开或全关)不是采用0-1变量编码,而是将各相同类型的闸门开启台数进行编码^[20]。这样可反映同种泄流设备启闭时,是开启的总台数决定调度方式,而与具体哪一个泄流设备以及其组合方式无关。对于23孔深孔,如果采用0-1编码,则搜索空间达 2^{23} 个;而按照开启的总台数编码,则搜索空间仅为24(0~23)个。因此,这种编码方法可减少冗余编码,提高算法效率。

c. 尽量考虑问题的约束条件。在采用遗传算法求解优化问题时,如果在编码中就考虑到某些约束条件,可使父代经过交叉、变异等操作,生成的新个体仍然满足这些约束条件,因而无需进行多余、不可行的计算,可提高算法的计算效率。

对于图2的A点和D点,它们的水位值应该相等,这样方可保证水位的连续性;同样B、C两点的水位值也应相等。在此约束条件下,优化变量进一步简化为6个^[47]。

在泄洪闸门控制问题中,导流底孔为22个,为了满足对称启闭条件,它在编码时取值为0~11,在解码时乘2得到实际的开启孔数^[20]。这样不仅满足了对称启闭的约束,还减小了问题的搜索空间。

d. 利用先验知识。遗传算法初始编码一般随机确定,往往造成寻优过程复杂耗时。在考虑电网分时电价时,各时段机组的运行方式具有一定的规律性,在效益大的时段多发电,引用流量也越大,因此可利用这一先验知识,根据各个时段的发电效益不同引入各时段的权重系数构造初始遗传编码^[25]。

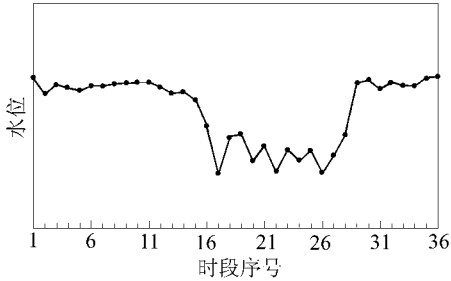


图1 每旬一个变量表示调度线

1.2 约束条件处理

水库调度中存在较多的约束条件,虽然在编码中可对其中的部分约束条件给予考虑,但这种方法不具有通用性。常用的约束条件与处理方法有:

a. 惩罚函数法。惩罚函数法是较通用的约束处理方法,可通过适当修改目标函数实现。但惩罚函数法的效率一般较低,惩罚系数难于确定:当惩罚系数太小时,算法可能收敛于不可行解;而惩罚系数太大时,又会使算法较早地收敛于某个局部最优解。为解决这一矛盾,可采用变量惩罚法,使惩罚系数随着进化代数的增加而动态增大^[12,18]。

b. 出库流量上下界、水库库容上下界约束处理。在水库优化调度问题中,约束条件一般包括出库流量上下界、水库库容上下界等,而这两者又通过水量平衡方程相互关联,因此在处理此类条件时,需要综合这三方面的因素,对出库(发电)流量上下界进行标定,然后从中随机产生个体,使之易于满足出库(发电)流量的上下界约束以及水库库容的上下界约束^[5,21]。

c. 总水量限制约束。水库优化调度问题一般给定始末状态,这样就限制了总出库水量,若选择各时段出库流量作为优化变量,给定调度末水位(状态)作为边界条件时,采用遗传算法优化往往难于找到满足该边界条件(调度末水位指定)的可行解。可采用两种方法处理该约束:①将严格等式约束松弛为不等式约束^[21]。发电调度末水位越高,则越有利于以后时段的发电,将严格等式要求松弛为不低于指定的调度末水位这一不等式,便于找到问题的可行解,提高算法效率;②如果计算周期内总水量超过限制水量,可将超出的水量通过等比例法来修正各优化变量^[25]。

1.3 早熟与全局收敛性

标准遗传算法容易早熟,理论上也不能保证算法的全局收敛性。防止早熟的主要方法是保持群体的多样性,目前对种群的多样性评价指标包括方差、熵、种群个体最优适应度与平均适应度的差值以及高于平均适应度的个体均值与最优个体的差值等^[17]。保持群体多样性的方法主要有:①引入共享函数限制相似个体在群体中的生长^[3,48];②将父代和子代合并,一起进行选择以增加群体的多样性^[18];③在进化过程中引入混沌序列,充分利用其对初值的敏感性、遍历性和随机性,抑制“早熟”收敛^[13];④采用两个种群的伪并行遗传算法^[35]。

为了保证遗传算法的全局收敛性,可采用如下方法进行改进:①进化过程中保留最优个体^[18,36];②采用倍体遗传算法^[7]。同时,可针对具体问题,改

进适应度函数、选择策略、交叉策略以及变异策略等,构造加速遗传算法。

1.4 参数设置

由于遗传算法中大的群体规模与少的计算量要求之间、高的变异概率与算法的收敛性要求之间存在固有的矛盾,导致了遗传算法的控制参数设置复杂,尚无简明统一的指导原则^[3]。控制参数的设置主要依靠试算,即通过多次计算得到相对合理的参数值。为解决静态参数的缺陷,可根据进化次数,动态地调整交叉或变异概率:①根据与最优个体的差异^[24,36],或者种群的多样性指标^[17],实现交叉概率、变异概率的自适应变化,即种群的差异越大,则交叉概率越大,变异概率越小;②在同一代种群中,设置不同个体的交叉、变异概率与适应度呈线性关系,以此进行交叉、变异概率的自适应调整^[22]。

1.5 混合遗传算法

a. 增加局部搜索的混合遗传算法。遗传算法长于全局寻优,但局部搜索能力不足;而基于梯度的搜索方法可弥补这一缺陷。因此,在遗传算法中嵌入局部搜索,可大大提高算法的效率,主要方法有:①利用每一代群体中的最劣个体的信息,计算梯度值,将传统的下降搜索算子嵌入遗传算法中^[21];②根据进化代数,动态地进行非均匀变异,使得算法在后期进行局部搜索^[26];③在进化中引入拟梯度以加速进化过程,同时在拟梯度的基础上对高斯变异加以改进构成新的遗传变异算子,构造出拟梯度遗传算法^[31];④在进化过程中引入混沌序列,同时对变异算子加以改进,构造出一种自适应误差反向传播变异算子,形成混沌杂交进化算法^[13];⑤采用模拟退火算法改进局部搜索能力^[27],或者将模拟退火算法和遗传算法相结合,构成并行组合模拟退火算法^[28]。此种混合遗传算法具有较强的通用性,容易移植处理其他优化问题。

b. 优化部分关键参数的遗传算法。遗传算法具有全局收敛能力,但需要较长的计算时间。在处理大规模问题中,折中的办法是采用遗传算法优化一部分参数。例如:①对于水库群随机动态规划问题,在确定了各水库的分配系数之后,可计算每个水库的需水量,由此将水库群分解为单个水库的随机动态规划问题,此时采用遗传算法优化水库的分配系数,使得整个库群的缺水量最小^[19];②在基于神经模糊网络的水库调度规则中,通过拟合最优调度过程的方法得到了神经网络调度规则,然后采用遗传算法优化一部分调度规则参数,进一步优化神经网络,使得输出的方差(不确定性)变小^[46];③在复杂的非线性水库群管理问题中,通过分析抽取复杂

变量,余下的问题可简化为一线性规划问题,遗传算法则用于对复杂变量的优化^[14];④在水电厂内经济运行问题中,采用动态规划在空间分配机组负荷,而遗传算法在时间上分配机组组合^[32]。此种混合遗传算法针对具体问题,可大大简化优化计算的复杂度,但一般不具通用性,难于移植。

1.6 多目标遗传算法

水库调度问题有多目标特征,遗传算法是以种群为进化单位的一种寻优算法,因此最终计算结果既可以是一个最优值,也可以是一个解集,这恰好合乎非劣解集的特点。在设定了多目标的排序规则后,可计算多目标问题的适应度函数值,从而构造多目标遗传算法,优化计算可一次性获得问题的非劣解集^[22,29]。可见,多目标遗传算法在寻求水库优化调度问题的非劣解集方面具有独特的优势。

1.7 遗传算法效率评定准则

在遗传算法优化计算中,由于其随机搜索的特点,初始化得到的解就有可能已经非常接近最优解,因此,仅仅依靠某特定条件下遗传算法得到了较优的计算结果,就认为该方法具有强的全局搜索能力或者很快的收敛速度,往往不能客观、真实地评价算法效率。可采用两方面的指标评价遗传算法的性能:

a. 最优性。对于很多实际问题,往往无法获知理论全局最优解,论证最优性可通过比较遗传算法和其他算法结果的优劣来评价。寻求理论上的最优解对于很多问题并没有太大的实际意义,只要保证得到的解较传统方法(如动态规划法)有所改进,就可以接受,或者认为遗传算法具有最优性。

b. 稳健性。评价遗传算法的效率时,不仅仅需要考究多次计算值的均值,还需要评价它们的离散程度:如果对于同一问题,可能出现很好的结果,也可能出现很差的结果,则该算法能否在实际中应用,需进一步分析。可给定迭代次数,分析多次计算结果的离散程度,用以评价算法的稳健性^[17,21,24]。

2 宜用遗传算法处理的水库调度问题

2.1 耗时与最优解

虽然理论上大部分遗传算法能收敛于全局最优解,但一般需耗用相当长的计算时间,因此,计算时间是遗传算法应用中的关键问题^[42]。在中小规模的优化计算中(优化变量在100个以内),如果目标函数不太复杂,遗传算法的优化结果往往优于传统方法,计算时间也可以接受。如采用1年的资料进行水库优化调度,计算时段长度为月,则优化变量为12个,在这些问题中,遗传算法的计算时间基本与动态规划法相当:在马光文等^[5]的研究中,遗传算法

所用时间稍高于动态规划法;在畅建霞等^[10]的研究中,相对于动态规划、逐步优化方法,遗传算法耗时最少;在钟登华等^[18]的研究中,遗传算法和动态规划法计算所需时间相差不大。但是对于大规模的水库优化调度问题,遗传算法不一定能在有限的时间内寻求到满意的解,例如在冯平等^[23]的研究中,计算时段长度仍为月,优化的资料长度为10年,需要优化的变量为120个,此时动态规划法的优化结果高出遗传算法约3.9%。可见,虽然理论上遗传算法可收敛至全局最优解,但在有限的计算时间内往往不能达到。视计算规模不同,遗传算法所需时间差别很大:单一水库的优化调度(12个优化变量)一般仅需几十秒^[10],在Ahmed等^[50]的研究中,优化需要计算时间为1~3h;而在Cui等^[44]的研究中,计算时间长达4.6d。因此,耗时与最优解之间存在的矛盾,制约了遗传算法在一些问题中的应用,需寻求某些方面的改进(改进或者混合遗传算法)。

2.2 适宜于采用遗传算法的条件和领域

a. 传统方法难以解决的问题。传统的线性规划、非线性规划以及动态规划技术在理论上可寻求到最优解或者近似最优解,但存在一定的适应范围和条件。如果传统方法可以较完美地解决问题,则无需采用遗传算法这一随机搜索方法,如总长度为10年的单一水库优化调度问题^[23]。但某些问题采用传统方法难以解决,主要包括:①存在一些约束条件难于处理,如模型的半结构化^[11];②不满足状态变量的无后效性、目标的可分离性、决策与状态的可逆性等条件,如决策变量为水库汛限水位^[48];③目标函数复杂,如强调水电机组启停成本、避开空蚀振动限制运行区间和考虑强制性开停机要求以及最小开停机时间约束的水电站厂内经济运行的数学模型^[33-34],其实质上是一整数混合规划问题,传统方法难于寻找全局最优解;又如考虑冲沙调度后目标函数相当复杂,必须采用基于模拟的优化方法^[26,41];在水量-水质联合调度中也存在类似的问题^[42]。

b. 时效性(实时性能)要求不高的问题。遗传算法作为一种随机搜索方法,在有限的计算时间内,最终计算结果具有一定的不确定性。使用遗传算法时,需要根据问题的特点进行算法设计,在计算时间与计算精度之间进行均衡。在时效性要求较高的实时调度中(如计算时段长为15min的水库优化调度),如果问题规模较大或者目标函数复杂,则选用遗传算法需慎重;一旦选择了遗传算法,需根据问题特点精心设计算法,以改进计算的收敛速度与稳健性,确保在规定时间内可得到较优的计算结果。而在中小规模的优化问题中,目标函数也不复杂;或者

在水库中长期调度、水库优化调度规则等属于规划阶段的问题中,对计算的时效性要求不高,因此只要能保证算法具有全局收敛能力即可。

模拟与优化相结合的水库调度技术,越来越为学者所推崇^[45]。遗传算法不依赖于问题本身,为求解此类复杂问题提供了一种通用的框架。如图3所示,给定调度规则、水库特征数据等待定参数,以历史水文资料作为输入,采用模拟技术可以计算方案的发电量、防洪风险等目标值;以此为基础,采用遗传算法进行优化求解,建立以模拟为基础的优化模型,不仅可以减小水库调度理论与实践的差距,还可以大大减少优化变量数^[45]。但基于模拟的优化方法需要相当长的计算时间,由于规划设计问题对计算时间没有太大的限制,且大都可以采用模拟-优化的方法解决,因此特别适宜于采用遗传算法求解。此外,遗传算法具有天然的并行性,可大大提高计算速度,提高大规模、复杂水库群调度问题的处理能力^[44]。因此,以遗传算法作为优化手段的模拟-优化方法在水库调度规则^[38-40,43-47,49-51]、水沙联合调度^[26,41]、水量-水质联合调度^[42]以及水库特征水位优化^[48]等方面得到了广泛的应用,具有广阔的应用前景。

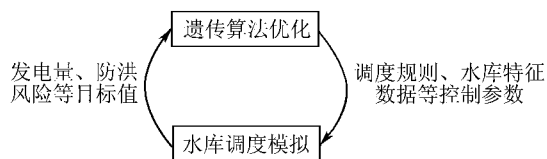


图3 基于模拟的优化调度框架

3 结 语

本文对遗传算法用于水库调度中的若干问题进行了探讨,可得到以下结论:

- a. 遗传算法的变种很多,参数确定也无明确规律可循,大大丰富了研究内容。遗传算法的编码、约束条件的处理非常重要,直接影响算法效率与精度。
- b. 遗传算法不依赖于问题的具体形式,可有效地解决传统优化方法难以解决的整数规划或0-1规划问题。在水库调度中,遗传算法适宜于传统方法难以求解的问题,以及时效性要求不高的实时调度问题,尤其是水库规划设计问题。

遗传算法作为一门新兴的优化技术,自身也在不断发展,可与神经网络、模糊理论以及小波技术等新兴技术相结合,为解决很多传统方法难以解决的问题提供新的思路;遗传算法具有天然的并行性,发展整体并行、粗粒度并行等并行遗传算法,可大大提高计算速度,提高大规模、复杂水库群调度问题的处理能

力。可以预见,在水库调度中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 郭生练. 水库调度综合自动化系统[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [2] YEH W W-G. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review[J]. Water Resources Research, 1985, 21(12): 1797-1818.
- [3] 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002.
- [4] 丁晶, 金菊良, 杨晓华, 等. 基因算法在水科学中的应用[J]. 人民长江, 1999, 30(增刊): 13-15.
- [5] 马光文, 王黎, WALTERS G A. 水电站优化调度的FP遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 1996(11): 77-81.
- [6] 马光文, 王黎, WALTERS G A. 水电站群优化调度的FP遗传算法[J]. 水力发电学报, 1996, 15(4): 21-28.
- [7] 伍永刚, 王定一. 二倍体遗传算法求解梯级水电站日优化调度问题[J]. 水电能源科学, 1999, 17(3): 31-34.
- [8] WARDLAW R, SHARIF M. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir resources[J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 1999, 125(1): 25-33.
- [9] SHARIF M, WARDLAW R. Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: case study[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2000, 14(4): 255-263.
- [10] 畅建霞, 黄强, 王义民. 基于改进遗传算法的水电站水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2001, 20(3): 85-90.
- [11] 方红远, 邓玉梅, 董增川. 多目标水资源系统运行决策优化的遗传算法[J]. 水利学报, 2001, 32(9): 22-27.
- [12] 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.
- [13] 袁晓辉, 袁艳斌, 权先璋, 等. 基于混沌进化算法的梯级水电系统短期发电计划[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 34-38.
- [14] CAI X, MCKINNEY D C, LASDON L S. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(24): 667-676.
- [15] CHANG Li-chiu, CHANG Fi-john. Intelligent control for modelling of real-time reservoir operation[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(9): 1621-1634.
- [16] 马光文, 王黎, 过夏明. 分时电价下多用途水库的运用方式研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 583-587.
- [17] 徐琦, 张勇传, 孔力, 等. 改进遗传算法在梯级电站日优化运行中的应用[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4): 51-53.
- [18] 钟登华, 熊开智, 成立芹. 遗传算法的改进及其在水库优化调度中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 22-26.
- [19] HUANG Wen-cheng, YUAN Lun-chin, CHI Ming. Linking genetic algorithms with stochastic dynamic programming to the long-term operation of a multireservoir system[J]. Water

- Resources Research, 2002, 38(12), 1304, doi: 10.1029/2001WR001122.
- [20] 刘攀,王才君,张洪刚,等.三峡水库围堰发电期泄洪闸门优化调度研究[C]//郭生练.水问题研究与进展:全国首届水问题研究学术研讨会论文集.武汉:湖北科学技术出版社,2003:373-377.
- [21] 宋朝红,罗强,纪昌明.基于混合遗传算法的水库群优化调度研究[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(4):28-31.
- [22] 游进军,纪昌明,付湘.基于遗传算法的多目标问题求解方法[J].水利学报,2003,34(7):64-69.
- [23] 冯平,李绍飞,安伟哲,等.三门峡水库电站运行调度的优化研究[J].天津大学学报,2004,37(4):294-297.
- [24] 付永锋,沈冰,李智录,等.基于自适应遗传算法的金盆水库优化调度研究[J].水电能源科学,2004,22(3):47-50.
- [25] 胡明罡,练继建.基于改进遗传算法的水电站日优化调度方法研究[J].水力发电学报,2004,23(2):17-21.
- [26] 练继建,胡明罡,刘媛媛.多沙河流水库水沙联调多目标规划研究[J].水力发电学报,2004,23(2):12-16.
- [27] 罗云霞,周慕逊,王万良.基于遗传模拟退火算法的水库优化调度[J].华北水利水电学院学报,2004,25(3):20-22.
- [28] 张双虎,黄强,孙廷容.基于并行组合模拟退火算法的水电站优化调度研究[J].水力发电学报,2004,23(4):16-19.
- [29] 朱仲元,朝伦巴根,杜丹,等.多目标遗传算法在确定串联水库系统优化运行策略中的应用[J].灌溉排水学报,2004,23(6):71-74.
- [30] 姜铁兵,梁年生,康玲,等.用遗传法确定水电站自动发电计划[J].水力发电学报,1995,14(4):7-14.
- [31] 袁晓辉,张双全,王金文,等.拟梯度遗传算法在水电厂内经济运行中的应用研究[J].电网技术,2000,24(12):66-69.
- [32] 刘博,周建中,杨敬涛.基于动态规划和遗传算法的混合算法研究[J].计算机仿真,2004,21(12):87-89.
- [33] 孙昌佑,马震岳.基于遗传算法的水电站厂内经济运行模型研究[J].水电能源科学,2004,22(1):48-50.
- [34] 王立明,马光文,张永丽.权衡电能损失和启停成本的水电站机组最佳运行计划[J].四川大学学报:工程科学版,2004,36(2):29-32.
- [35] 杨敬涛,周建中,向凌,等.伪并行遗传算法及其在水电站经济运行中的应用[J].电网技术,2004,28(14):53-56.
- [36] 王亚娟,熊信良.基于遗传算法的水火电混合电力系统短期发电计划优化[J].继电器,2000,28(10):21-24.
- [37] ZOUMAS C E, BAKIRTZIS A G, THEOCHARIS J B, et al. Genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1356-1364.
- [38] OLIVEIRA R, LOUCKS D P. Operating rules for multireservoir systems[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 839-852.
- [39] CHANG Fi-john, CHEN Li. Real-coded genetic algorithm for rule-based flood control reservoir management [J]. Water Resources Management, 1998, 12(3): 185-198.
- [40] MERABTENE T, KAWAMURA A, JINNO K, et al. Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(11): 2189-2208.
- [41] CHANG Fi-john, LAI Jih-sung, KAO Li-shan. Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(8): 1623-1640.
- [42] CHAVES P, KOJIRI T, YAMASHIKI Y. Optimization of storage reservoir considering water quantity and quality [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(14): 2769-2793.
- [43] CHEN L. Real coded genetic algorithm optimization of long-term reservoir operation [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(5): 1157-1165.
- [44] CUI L J, KUCZERA G. Optimizing urban water supply headworks using probabilistic search methods [J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 2003, 129(5): 380-387.
- [45] KOUTSOYIANNIS D, ECONOMOU A. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems [J]. Water Resources Research, 2003, 39(6): 1170, doi: 10.1029/2003WR002148.
- [46] PONNAMBALAM K, KARRAY F, MOUSAVI S J. Minimizing variance of reservoir systems operations benefits using soft computing tools [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 139(2): 451-461.
- [47] TUNG Ching-pin, HSU Shao-yiu, LIU Chia-ming, et al. Application of the genetic algorithm for optimizing operation rules of the LiYuTan Reservoir in Taiwan [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(3): 649-657.
- [48] 刘攀,郭生练,王才君,等.三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J].水利学报,2004,35(7):87-91.
- [49] AKTER T, SIMONOVIC S P. Modelling uncertainties in short-term reservoir operation using fuzzy sets and a genetic algorithm [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(6): 1081-1097.
- [50] AHMED J A, SARMA A K. Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir [J]. Water Resources Management, 2005, 19(2): 145-161.
- [51] HUANG Wen-cheng, YUAN Lun-chin. A drought early warning system on real-time multireservoir operations [J]. Water Resources Research, 2004, 40(6), W06401, doi: 10.1029/2003WR002910.

(收稿日期:2005-08-05 编辑:熊水斌)