

人工免疫系统在梯级水库群短期优化调度中的应用

左 幸, 马光文, 徐 刚, 陶春华

(四川大学能源发展研究中心, 四川 成都 610065)

摘要: 免疫起源于抗感染的研究, 是一种机体识别和排斥抗原性异物的生理功能。现代仿生技术将免疫应用到解决非线性优化问题中, 形成了独特的人工免疫系统(AIS), AIS用抗体代表问题的可行解, 用抗原代表问题的约束条件和目标函数, 采用期望繁殖率来定义父体选择的概率进行随机搜索全局最优解。将 AIS 应用到梯级水库群短期(日)优化调度的研究中, 经过对某梯级水库群的仿真计算, 认为其结果是合理和可实际应用的。

关 键 词: 人工免疫系统; 梯级水库; 优化调度

中图分类号: P343.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2007)02-0277-05

梯级水库群短期最优运行调度是研究在较短的时间(一般为日)内水电站及其水库最优运行调度方式的制定和实施的有关问题^[1]。相对于单个水库的短期优化调度, 梯级水库群由于存在空间上和时间上的水力联系, 其寻优过程往往更为复杂, 局部最优解会更加影响全局最优解的搜索。传统的动态规划虽然可以较好地解决单库优化调度问题, 但是当将其运用到梯级多水库时将会产生“维数灾”, 有学者考虑采用蚁群算法(ACA)和逐步优化算法(POA)对梯级水库优化调度进行求解取得了部分研究进展, 但是对于其还没有较为理想的优化方法。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)是一种全局随机概率搜索方法, 其具有多样性、耐受性、免疫记忆、分布式并行处理、自组织、自学习、自适应和鲁棒性等特点^[2]。通过用抗体代表问题的可行解, 抗原代表问题的约束条件和目标函数, 采用能体现抗体促进和抑制的期望繁殖率来选择父个体, 从而达到快速收敛到全局最优解的目的。本文考虑到人工免疫系统的全局搜索特性, 将其尝试性应用到梯级水库群短期优化调度问题中, 通过实例计算取得了较好的效果。

1 梯级水库群短期优化调度

在梯级水库群没有防洪任务或下游不存在防洪对象时, 其优化调度目标就转为求解带有电站的水库的短期(一般为日)效益最大。为了求得梯级日收入最大, 需要得出当日系统的市场出清价和构造优化调度数学模型。

1.1 市场出清价预测

在目前电力市场环境下, 电力市场运营中心按照各个带有电站的水库的报价由低至高进行排列, 安排满足系统预测负荷要求和系统安全稳定性的前 N 个水库发电, 最后一个被安排发电计划的水库报价即为市场出清价(MCP), 全部水库的电价按照该 MCP 进行结算。本文研究重点不在于 MCP 的预测, 文中采用了比较成熟的人工神经网络模型预测次日 96 点的市场出清价, 算法见文献[3]。

1.2 梯级水库群短期优化调度数学模型

(1) 目标函数

$$P = \max \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^n 0.25 C_t A_h Q_{h,t} H_{h,t} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-07-14; 修订日期: 2006-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50539140)

作者简介: 左 幸(1980 -), 男, 四川三台人, 博士研究生, 主要从事水电经济管理及电力市场研究。

E-mail: drowzy@163.com

(2) 约束条件

$$\text{水量平衡约束} \quad V_{h,t+1} = V_{h,t} + q_{h,t} - Q_{h,t} - S_{h,t} \quad (2)$$

$$\text{水库蓄水量约束} \quad V_{h,t,\min} \leq V_{h,t} \leq V_{h,t,\max} \quad (3)$$

$$\text{水库下泄流量约束} \quad Q_{h,t,\min} \leq Q_{h,t} \leq Q_{h,t,\max}, S_{h,t} \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{电站出力约束} \quad N_{h,t,\min} \leq A_h Q_{h,t} H_{h,t} \leq N_{h,t,\max} \quad (5)$$

$$\text{梯级水库群时空水力联系} \quad Q_{h+1,t} = Q_{h,t-\tau} + Q_{ah+1,t} \quad (6)$$

式中 P 为梯级日发电量收入(元); C_t 为第 t 时段市场出清价(预测值); A_h 为水库 h 综合出力系数; $Q_{h,t}$ 为水库 h 在 t 时段发电流量, m^3/s ; $H_{h,t}$ 为水库 h 在 t 时段平均发电净水头, m ; T 为日内计算总时段(计算时段为 15 min , $T=96$); n 为梯级中所含水库的总数; 0.25 为单位换算系数; $V_{h,t+1}$ 为水库 h 第 t 时段末水库蓄水量; $V_{h,t}$ 为水库 h 第 t 时段初水库蓄水量; $q_{h,t}$ 为水库 h 第 t 时段平均入库流量; $S_{h,t}$ 为水库 h 在 t 时段弃水流量; $V_{h,t,\min}$ 为水库 h 第 t 时段应保证的水库最小蓄水量; $V_{h,t,\max}$ 为水库 h 第 t 时段允许的水库最大蓄水量。 $Q_{h,t,\min}$ 为水库 h 第 t 时段应保证的最小下泄流量; $Q_{h,t,\max}$ 为水库 h 第 t 时段允许的最大下泄流量; $N_{h,\min}$ 为水库 h 允许的最小出力; $N_{h,\max}$ 为水库 h 的最大出力限制; $Q_{h+1,t}$ 为水库 $h+1$ 第 t 时段的发电流量, 其值等于上一个水库 h 第 $t-\tau$ 时段的发电流量; τ 为两个水库间水流流达时间(滞时); $Q_{ah+1,t}$ 为水库 $h+1$ 第 t 时段的区间来流量。

2 人工免疫系统

2.1 基本概念

抗原: 指目标函数和约束条件。

抗体: 指目标函数的可行解。

本文采用实数编码的人工免疫系统。相对于一般二进制编码算法, 具有运算速度快、适合搜索大范围连续空间和解决高维问题的特点。同时, 实数编码的人工免疫系统在计算两个抗体相似度时采用欧式空间二次泛数 $H_{v,w}$, 而二进制编码的免疫算法则普遍采用信息熵的概念, 这是二者不同之处。

$$H_{v,w} = \left[\sum_{i=1}^m (w_{i,v} - w_{i,w})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中 $w_{i,v}$ 和 $w_{i,w}$ 分别为抗体 v 和 w 中第 i 个决策变量值。抗体 v 和抗体 w 间的相似度为

$$ay_{vw} = \frac{1}{1 + H_{v,w}} \quad (8)$$

抗原与抗体的亲和力: 用于表明抗体对抗原的识别程度。抗体 v 和抗原 v 的亲和力为

$$ax_v = Opt_v \quad (9)$$

式中 Opt_v 表示抗原和抗体之间的结合度^[4]。一般情况下采用目标函数值来表示, 文献[5]提出在其中加入奖励项可以适当考虑到自然免疫系统中的 BALDWIN 效应(其基本思想是: 如果学习有助于生存, 那么学习最好的有机体将有最多的后代, 从而影响到学习有关的基因在种群中的频率)。

2.2 实数编码的免疫算法计算步骤

(1) 分析问题, 设计解的合理表达形式;

(2) 给机体注射疫苗, 使其产生初次免疫应答^[6];

(3) 从产生初次免疫应答的抗体中选择 M 个作为初始种群, 并且随机生成 N 个抗体, 其中 N 是记忆库的大小;

(4) 对初始抗体进行评价, 评价标准采用期望繁殖率 e_v , 其计算方法为

$$\text{计算抗体 } v \text{ 的浓度 } C_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N ac_{vw} \quad (10)$$

式中 $ac_{vw} = \begin{cases} 1, & ay_{vw} \geq Tac \\ 0, & ay_{vw} < Tac \end{cases}$, Tac 是已确定的浓度阈值。

计算抗体 v 的期望繁殖率
$$e_v = \frac{ax_v}{C_v} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 抗体 v 的期望繁殖率 e_v 与亲和力 ax_v 成正比, 与抗体浓度 C_v 成反比, 所以采用抗体的期望繁殖率进行评价可以同时体现免疫系统对亲合度高的抗体的促进和对浓度高的抗体的抑制, 这样可以维持抗体的多样性, 避免过早陷入局部最优;

(5) 形成父代群体, 将初始群体按 e_v 的降序排列, 并取前 M 个个体构成父代群体; 再按照 ax_v 降序排序同时取前 N 个个体存入记忆库中;

(6) 判断是否满足结束条件, 是, 则结束; 否, 则继续下一步操作, 若评价结果有更优的抗体, 将其放入记忆库中, 同时删除记忆库中抗体和抗原亲合度较低的抗体;

(7) 新群体的产生, 基于第4步的计算结果对抗体群体按照其评价结果进行交叉和变异处理, 得到新群体。再从记忆库中取出记忆的个体, 共同构成新一代群体;

(8) 转去执行第4步。

3 基于人工免疫系统的梯级水库群短期优化调度研究

3.1 编码问题

对于梯级水库群短期优化调度, 本文没有直接将96个时段进行编码处理, 而是按照系统负荷需求变化情况, 将日内划分为5个时段, 先对5个时段进行优化计算。编码时需要涉及到各水库各时段的库容变化范围, 本文按照分别从开始时段和结束时段通过来水量和最大过机流量进行计算统计出各水库各时段库容变化范围, 进而计算出其库水位变化范围。编码采用实数编码, 编码长度为 $5n$, 取值范围 $[0, 1]$ 。

3.2 抗体和抗原的结合力(目标函数)

考虑到目前电力市场条件下各时段采用不同的出清价, 目标函数没有采用日发电量最大, 而是采用日收入最大化。日收入越大, 说明该抗体与抗原的结合力(适应度)越强。

3.3 约束条件处理

本次研究将约束条件作为罚函数考虑进目标函数, 如果产生的抗体解码后计算值不满足约束条件, 则在目标函数中直接除以一个与超过约束条件具体量值相关的极大值(即超过约束越多, 极大值越大), 使目标函数成为一个极小的非负数。

3.4 疫苗注射

根据文献[6], 其疫苗来自于相关问题的先验知识。本文考虑采用大范围试算方式进行疫苗接种。通过随机生成一批抗体, 计算其与抗原的结合力, 并按降序排序, 取前 M 个作为父个体。经过成功接种后, 机体产生了初次应答, 后面的二次应答就会比初次应答来得更为猛烈。

3.5 交叉变异

对于初期的人工免疫系统, 一般较少采用交叉算子, 仅仅使用变异算子。葛红等^[5]提出采用交叉算子并不会破坏抗体的遗传特性, 相反还可以使抗体较快收敛到问题的全局最优解。本文采用标准遗传算法中交叉和变异算子作为免疫系统的交叉和变异算子, 使用期望繁殖率来进行轮盘赌选择从而产生父代个体, 采用随机多点变异对抗体进行进化。

3.6 关于记忆库

早期人工免疫系统较少使用记忆库, 后来认为使用记忆库对加快抗体的收敛性有一定作用。分析了其在梯级水库群短期优化调度中的作用, 当采用原始定义的记忆库时(将每代中期望繁殖率最高的前 N 个个体存入记忆库), 由于抗体中变量个数较多, 产生了局部最优情况。根据实际情况, 笔者将记忆库定义修改为将历代最优

个体(按照结合度定义)存入记忆库,当记忆库存满后,删除最早存入记忆库的抗体,加入新的抗体。经过编程计算,其整个抗体跳出局部最优的能力大大加强。

3.7 大时段计算后处理

在对梯级水库群 1 d 的发电计划进行大时段优化时分成了 5 个时段,第一次优化结束后具有各时段末的水库水位,发电量、发电流量、弃水流量和时段平均净水头。然后对于每一个时段进行“子系统优化”,即在满足时段初末的水位条件和时段发电量的前提下,将时段电量按照市场出清价权重分配到各子时段(15 min),从而得到最终优化结果^[7]。

4 实例仿真计算

用四川省电力市场中南桠河梯级水电站数据计算。该梯级包含 3 个水电站冶勒、姚河坝和南瓜桥,冶勒为多年调节电站,姚河坝和南瓜桥电站水库有区间入流汇入。冶勒电站水库正常蓄水位 2 650 m,死水位 2 600 m,最大引用流量 47.24 m³/s,电站综合出力系数 8.56,装机容量 24.0 万 kW;姚河坝电站为日调节水库,正常蓄水位 1 678 m,死水位 1 666 m,最大引用流量 53.4 m³/s,电站综合出力系数 8.75,装机容量 13.2 万 kW;南瓜桥电站也是日调节水库,正常蓄水位 1 369.5 m,死水位 1 363.5 m,最大引用流量 53.4 m³/s,电站综合出力系数 8.03,装机容量 12.0 万 kW。预测的电力市场出清价如图 1 所示,日内梯级平均入流量 10.0 m³/s,冶勒、姚河坝、姚河坝、南瓜桥区间来水量分别为 8 m³/s、5 m³/s,给定冶勒电站日允许消落水位确定梯级日用水量 86.4 万 m³,求梯级水库群最优发电计划使梯级发电收入最大。人工免疫系统抗体种群规模为 30 个,记忆库容量为 5 个,抗体浓度阈值 0.40,交叉率 0.85,变异率 0.05。

在经过人工免疫系统优化后,梯级 3 个水库的日水位变化过程线分别如图 2~图 4 所示。

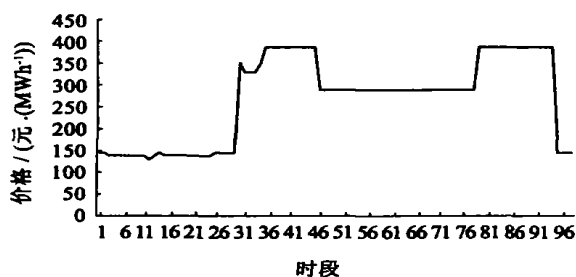


图 1 2003 年 3 月 6 日市场出清价过程线

Fig. 1 MCP curve on March 6, 2003

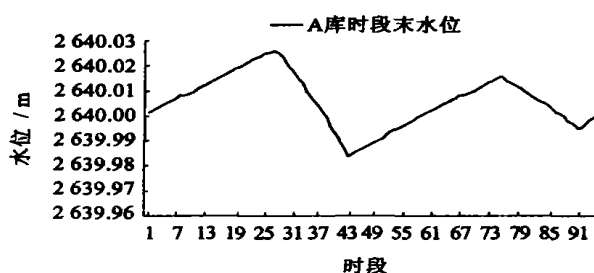


图 2 冶勒电站各时段末水位过程线

Fig. 2 Water level curve for Yele reservoir in every period

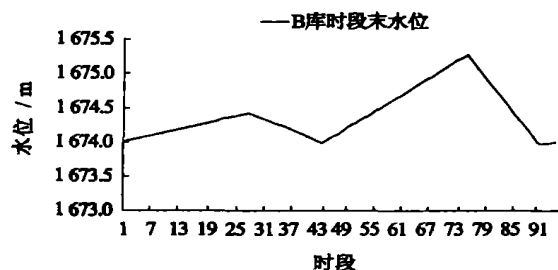


图 3 姚河坝水库各时段末水位过程线

Fig. 3 Water level curve for Yh reservoir in every period

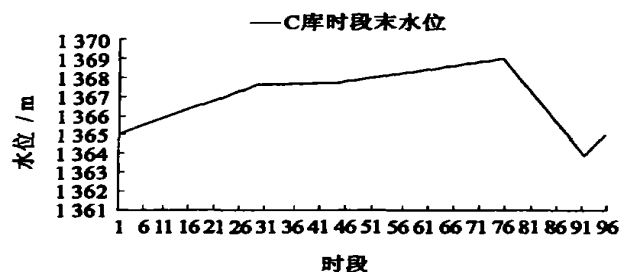


图 4 南瓜桥水库各时段末水位过程线

Fig. 4 Water level curve for Ng reservoir in every period

整个梯级水库群的日出力过程如图 5 所示。

分析图 2~图 4 可以看出,梯级各水库水位变化过程相互对应,均在高电价时段加大下泄,低电价时段蓄

水。同时冶勒水库发挥了多年调节水库的优势，通过水库蓄放，调配更多的水量在姚河坝、南瓜桥水库高电价时段发电，整个梯级在该日的发电收入为 125.780 万元。图 5 中可以看出整个梯级的出力和市场出清价在时段上是相一致的，价格高时多发电，价格低时少发电或不发电，这完全符合梯级水库群短期优化调度的指导方针。

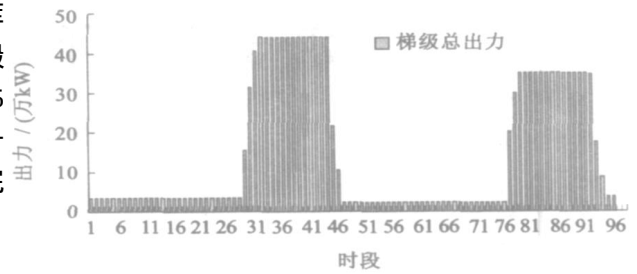


图 5 梯级水水库群短期优化结果图

Fig. 5 Short-term optimization result of the cascade reservoirs

5 结 论

人工免疫系统具有较强的多样性、耐受性、免疫记忆、分布式并行处理、自组织、自学习、自适应和鲁棒性等特点，本文将其引入到解决梯级水库群短期优化调度问题中，并且具有以下几个特点：

- (1) 引入了疫苗接种机制，相对于遗传算法加快了收敛速度；
- (2) 采用改进的记忆库设计体系，突破了传统免疫算法在求解较多变量时易于陷入局部最优的困境；
- (3) 收敛性较好，不容易出现维数灾的问题。该算法从仿真结果来看结果比较理想，同时计算速度较快，不失为解决梯级水库群短期优化调度的一种可行办法。

参考文献：

- [1] 马光文, 王 黎. 水电竞价上网优化运行[M]. 成都:四川科学技术出版社, 2003. 166 - 169.
- [2] 李 涛. 计算机免疫学[M]. 北京:电子工业出版社, 2004. 39 - 52.
- [3] 刘正国, 付详明. 基于神经网络的浙江发电市场清算电价预测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 49 - 52.
- [4] Gwo-Ching Liao, Ta-Peng Tsao. Application embedded chaos search immune genetic algorithm for short-term unit commitment[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71:135 - 144.
- [5] 葛 红, 毛宗源. 免疫算法的实现[J]. 计算机工程, 2003, 29(5): 63 - 64.
- [6] 王 磊, 潘 进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74 - 78.
- [7] Suzannah Yin, Wa Wong. Hybrid simulated annealing/ genetic algorithm approach to short-term hydro-thermal scheduling with multiple thermal plants[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23:565 - 575.

Artificial immune system and its application in short-term optimal scheduling of hydro-plants in cascade reservoirs^{*}

ZUO Xing, MA Guang-wen, XU Gang, TAO Chur-hua

(Center of Energy Development Research of Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : Immunity, a basic physiology, is derived from the research of anti-infection, whose organism recognizes antigenicity and rejects them. Modern bionic technologies use immunity to solve nonlinear programming problems and form particular artificial immune system (AIS) which represents feasible solutions through antibodies and embodies constraints and objective function through antigen. AIS also adopts anticipant productive rate to define selection probabilities which can be used for random search of the whole optimal solution. According to the application of AIS to the short-term optimal scheduling of hydro plants in cascade, the AIS is confirmed.

Key words : artificial immune system; cascade reservoirs; optimal scheduling

^{*} The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50539140).