

基于粒子群算法的水电站水库发电调度图绘制

杨子俊, 王丽萍, 邵琳, 吴月秋

(华北电力大学水资源与水利水电工程研究所, 北京 102206)

摘要: 在基于常规方法的水电站水库发电调度图绘制方法中, 由于选取典型水文年样本数量有限, 使其水文特征代表性有局限性。引入粒子群算法, 利用所有历史实测资料绘制水电站发电运行调度图。该算法通过粒子间的信息共享来实现求解, 具有计算简便, 收敛速度快的优点。通过实际生产项目的应用, 证明采用粒子群算法绘制水电站水库发电运行调度图能够克服常规绘制方法中的一些缺点, 在保证可靠性指标的同时, 提高了水电站的运行效益, 为优化方法在水电站中长期调度中的应用提供了一种实用的途径。

关键词: 粒子群算法; 发电调度图; 发电效益

Drawing of the reservoir operation chart based on the particle swarm optimization algorithm

YANG Zi-jun, WANG Li-ping, SHAO Lin, WU Yue-qiu

(Research Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In past, when drawing the operation chart of reservoir, limited samples of hydraulic characteristics are used. However, particles swarm optimization (PSO) this paper introduced has the advantage of simple calculation and good convergence, and it uses of all information from historical data available to draw reservoir operation chart. PSO has been applied in practice and obtained the satisfactory results compared with previous method, which is an useful reference to medium and long-term optimal operation of hydropower station.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50609007).

Key words: particle swarm optimization algorithm; reservoir operation chart; power generation benefit

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0059-04

0 引言

水电站水库优化调度是历年来的一个重要研究课题, 随着系统科学及智能优化算法的出现, 一些优化理论和方法在水库优化调度中得到广泛的应用。如大系统分解或分级优化理论、动态规划法、遗传算法、蚁群算法等等^[1-2]。但由于优化调度方案与实际调度存在偏差, 从目前的水电站水库优化调度的应用水平来看, 基本上还不能够用优化调度方案来具体指导水电站水库实时调度, 水库常规发电调度图仍是水电站运行调度最常用的工具, 对指导水电站水库长期运行具有重要意义^[3]。具有年和季调节性能的水电站发电调度图绘制的常规方法是: 从历史实测径流资料中选取若干符合设计保证率要求的典型年做样本, 对各年均按保证出力自供水期末死水位开始, 逆时序进行水能计算至供水期初,

得出各年水电站运行的蓄水变化过程, 然后取其上下包线作为上下基本调度线, 再以上下基本调度线为边界条件, 向上绘制加大出力线, 向下绘制降低出力线^[4]。

由于历史实测资料的有限性, 且年来水在年际和年内的分配都很不均匀, 少量典型年样本很难反映水库来水与发电用水间组合的代表性。因此, 以此绘制的常规发电调度图具有其局限性一面^[5]。基于此, 本文引入粒子群算法绘制水电站水库发电调度图, 充分地利用所有实测资料信息, 而不仅仅是典型水文年, 而且在计算调度图的同时能够直观地显示出在满足各种约束条件下水电站按调度图模拟运行的效益, 因此就非常方便地在绘制过程中对调度图进行优选, 从而达到提高水电站运行效益的目的。

1 算法分析

粒子群算法由 James Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出^[6]。其基本思想源于对鸟类群体行为的

研究, 算法的实质是根据个体与环境的适应程度, 并通过群体中的信息共享来实现寻优。粒子群算法具有计算简便, 收敛速度快等优点, 已广泛应用于各个领域^[7]。

粒子群算法的基本思想是: 问题的每一个解被称为一个粒子, 算法首先初始化生成一个含 m 个粒子的随机粒子群 (初始解), 每个粒子的位置就是一个潜在解, 然后该粒子群在 D 维搜索空间中以一定的速度飞行, 每个粒子在搜索时, 同时考虑自己搜索到的历史最好点和群体内其他粒子的历史最好点, 并以此为依据进行位置变化^[8]。将群体内粒子编号, 则第 i 个粒子 ($1 \leq i \leq m$) 的位置表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$; 速度表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$; 经历过的历史最好点表示为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$; 群体内所有粒子经过的最好的点表示为: $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。

粒子的位置和速度根据如下方程进行变换:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \xi (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

其中: ω 为惯性权重因子; c_1 和 c_2 称为学习因子, 为常数, 一般取 $c_1 = c_2 = 2$; ξ 和 η 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; v_{id}^k 为粒子 i 第 k 次迭代时在 d 维空间上的飞行速度。

从式 (1) 可以看出, 粒子的飞行速度由三部分构成。第一项是粒子飞行中的惯性作用, 是粒子能够进行飞行的基本保证。惯性权重因子 ω 可起到调整算法全局和局部搜索能力的作用, 较大的惯性权重使粒子具有更大的飞行速度, 具有更好的探索能力, 有利于提高收敛速度; 较小的惯性权重具有较小的飞行速度, 具有更好的开发能力, 有利于提高算法的收敛精度。第二项是粒子的自我“认知”部分, 表示粒子飞行中考虑到自身的经验, 向自己曾经找到的最好点靠近。第三项是粒子的“社会”部分, 表示粒子飞行中考虑到社会经验, 向群体中其他粒子学习, 使粒子在飞行过程中向群体内所有粒子曾经找到过的最好点靠近。第三项是粒子群算法的关键, 若没有这一项, 算法等于各个粒子单独飞行, 得到最优解的概率就很小^[9]。

2 粒子群算法在水电站水库发电调度图绘制中的应用

2.1 粒子的构造

应用粒子群算法绘制调度图, 思想是将每个粒子构造成为一份调度图, 即每个粒子的位置是一个

$N \times D$ 的二维数组, N 为调度图含调度线的条数, D 为调度线长度, 对应粒子群算法粒子的维数。

2.2 适应度函数的确定

根据上述介绍可知, 粒子的适应值是衡量粒子飞行位置优劣的唯一指标, 因此结合水库发电运行的求解目标, 便可直接以发电量目标函数为适应度函数, 即:

$$E = \sum_{i=1}^T k \cdot q \cdot h \quad (3)$$

其中: E 为发电量; k 为出力系数; q 和 h 分别对应时段 i 引用流量和发电水头; T 为计算时段总长。

对任一粒子进行适应值计算时, 即是按粒子所示发电调度图对水电站水库进行模拟运行, 充分利用已知的历史实测资料, 以多年模拟运行的效益结果作为适应值, 能直观地表示出各粒子的优劣, 有效的将调度图绘制与调度图的应用目的相结合, 以保证最终调度图的实用性。

当考虑到水电站的出力保证率时, 可以将保证率以罚函数的形式进行处理。

2.3 约束条件的处理

水库调度运行是个典型的多约束问题, 主要有以下约束条件:

水位 (库容) 约束:

$$Z_{\min} \leq Z_i \leq Z_{\max} (V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}) \quad (4)$$

出力约束:

$$N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max} \quad (5)$$

水库下泄流量约束:

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (6)$$

水量平衡方程:

$$V_{i+1} = V_i + (q_i - Q_i) \cdot \Delta T \quad (7)$$

其中: Z_i 、 V_i 、 N_i 、 Q_i 和 q_i 分别对应 i 时段水库的水位、库容、出力、出库流量和入库流量; Z_{\min} 、 Z_{\max} (V_{\max} 、 V_{\min}) 分别为水库最小、最大水位 (库容) 限制; N_{\min} 、 N_{\max} 分别为水库最小、最大出力限制; Q_{\min} 、 Q_{\max} 分别为水库最小、最大下泄流量限制; ΔT 为时段时间长度。

其中出力约束、水库下泄流量约束和水量平衡方程约束在水库调度运行计算中直接加以限制即可控制, 而水位 (库容) 约束除了需要在水库调度计算中加以控制外, 还需在构造粒子以及粒子飞行中加以控制。首先, 算法中每一个粒子即对应一份调度图, 而调度图的调度线实质是水位指示线, 因此在构造初始粒子时, 应加以严格的边界约束; 其次, 调度图上的各调度线应该是不交叉 (可重合) 的,

也应严格控制; 再次, 初始化粒子满足上述约束, 但在飞行过程中, 可能跳出边界约束, 因此需要对每一次粒子飞行的速度加以限制, 即粒子的飞行速度不能超过其最大飞行速度 v_{max} , v_{max} 由粒子初始位置和边界条件确定。

2.4 对基本粒子群算法的改进

基本粒子群算法收敛快, 但也与其他进化类方法一样, 存在易陷入局部最优的缺陷, 因此在应用中可对原算法作适当的改进处理, 以尽量避免这种收敛“早熟”, 来求得全局最优解。

前面已经介绍, 惯性权重因子可起到调整算法全局和局部搜索能力的作用。在算法的早期迭代中, 应该采用较大的惯性权重因子, 这样有较强的全局搜索能力, 而在算法后期, 应该采用较小的惯性权重因子, 具有较强的局部精细搜索能力。这里, 采用自适应调整的计算公式来确定惯性权重^[10]:

$$\omega(t) = 0.9 - \frac{t}{\max T} \cdot 0.5 \quad (8)$$

其中: t 为当前迭代次数; $\max T$ 为最大迭代次数。

2.5 粒子群算法绘制调度图流程

应用粒子群算法绘制调度图的流程如下^[11]:

Step1: 在初始化范围内, 对粒子群初始化 (生成初始调度图), 包括初始位置和速度。

Step2: 计算每个粒子的适应值 (多年模拟运行效益值)。

Step3: 比较适应值。将每个粒子的适应值与自己所经过的最好位置的适应值比较, 若更优, 则将其作为新的个体历史最优值; 将每个粒子的适应值与群体内经历的最好位置的适应值比较, 若更优, 则将其作为新的群体历史最优值。

Step4: 根据式 (1) 和式 (2) 更新粒子的速度和位置。

Step5: 判断终止条件; 若达到终止条件, 则输出调度图绘制结果及相应的适应值 (效益值), 然后退出程序, 否则返回 Step2。

3 实例应用

在验证了用粒子群算法绘制调度图的可行性和有效性之后, 将该方法应用于某水电站水库发电调度图的修订和重新绘制项目中。该水电站具有年调节能力, 以发电为主。水库正常蓄水位 627 m, 死水位 555 m, 保证出力 150.3 MW, 装机容量为 300 MW, 出力系数 8.3, 无防洪要求。已知该水库的水位~库容关系曲线、下游水位~下泄流量关系曲线、预想出力~发电水头关系曲线以及水库 50 年的径流资料。经计算分析研究, 拟定粒子群算法的种群规

模为 30, 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ 。

对该水库分别按常规方法和粒子群算法绘制年发电调度图 (这里仅列举上下基本调度线), 具体结果如下所示。

常规方法选取的典型水文年数为 6, 绘制调度图结果见图 1。

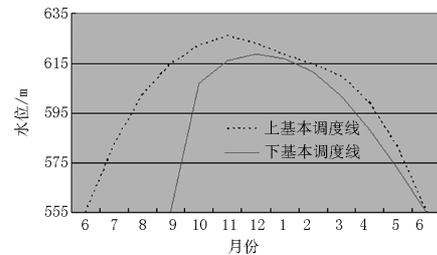


图 1 常规方法绘制调度图

Fig.1 Operation chart according to conventional methods

水电站按图 1 所示调度图进行多年模拟运行, 得到多年平均发电量为 17.29 亿 kWh。

粒子群算法以年均发电量为适应度函数, 为了便于比较, 以按图 1 模拟运行所得保证率作为惩罚项, 绘制调度图见图 2。

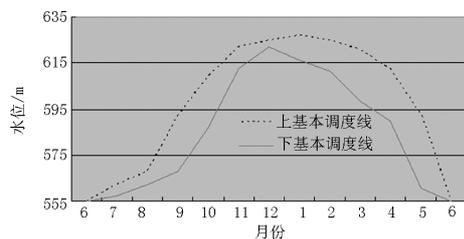


图 2 粒子群算法绘制调度图

Fig.2 Operation chart according to PSO

水电站按图 2 所示调度图进行多年模拟运行, 得到多年平均发电量为 17.48 亿 kWh, 与按调度图 1 运行时保证率一致, 发电量提高了 1.1%, 经济效益显著。

通过对两图比较可知, 下基本调度线的变化不大, 其变化主要集中在 6~10 月份; 上调度线变化比较大, 图 2 所示调度线在 6~10 月份明显低于图 1, 而在 1~5 月份又明显高于图 1。结合多年模拟运行过程和径流特点, 对调度图 2 的合理性分析如下:

6~10 月份为汛期, 水库来水量大, 无论以上述哪条下基本调度线作为发保证出力的边界条件, 这几个月都能满足发保证出力, 因此下调度线在此变化范围内对整个运行结果的影响不大。调度图 1 在汛期的上基本调度线高于调度图 2, 导致水电站按保证出力运行的机会增加, 水库容易较早蓄满, 产

生更多弃水;调度图 2 在汛期上基本调度线的降低,运行过程中加大出力的机会增加,在保证水库汛末蓄满的前提下,减少了弃水量,有利于提高发电效益。

在枯水期的 1~5 月份,图 2 较图 1 的上基本调度线稍有偏高,这样减小了加大出力的机会,使水电站尽量按保证出力运行,减缓水库水位消落速度,使水库发电运行维持在相对较高的水头,有利于提高发电效益。因此,图 2 较图 1 的变化是合理的,体现了优化方法在水电站水库调度图绘制中的优越性,提高了优化方法在水电站优化调度中的实用性,得到了生产单位的肯定。

常规方法以符合设计保证率的典型水文径流过程作为计算依据,有其水文理论基础,但由于典型水文年代表性不足,调度规则相对保守,不利于充分发挥水库的运行效益。粒子群算法则不考虑绘制调度图的理论基础,以优化理论思想为前提,从调度图的实际运用目的出发,以水库的运行效益为目标,以设计保证率等其他要求为约束条件,直接以模拟运行的结果优劣来择优选择调度图,能比常规方法获得更具实用价值的调度图。

4 结论

粒子群算法是一种智能优化算法,具有全局寻优能力和收敛速度快的特点,且计算方便,编程简单。本文将粒子群算法引入水电站水库运行调度图编制中,实际应用表明,用粒子群算法编制调度图能直观地反应调度图模拟运行的实际成果,有利于在绘制过程中对调度图进行优选,省掉了人为选择、处理典型水文年的过程,能够在满足各种约束条件下,提高水电站的发电效益,取得较满意的结果,为优化方法在水电站优化调度中的实用性提供了一条可行的途径,也为绘制水库调度图提供了一种新的有效的方法。

参考文献

- [1] 张铭. 水电站水库调度图及短期优化调度研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [2] 张丽娜. 水电站优化调度模型及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [3] 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: 工学版, 2004, 37 (3): 5-7.
- ZHANG Ming, WANG Li-ping, AN You-gui, et al. Optimizing study on reservoir operation chart[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2004, 37(3): 5-7.
- [4] 李再龄. 关于水电站调度图中基本调度线的探讨[J]. 江西水利科技, 1989(4):2-6.
- [5] 王平. 水库发电调度图常规计算方法的问题和改进建议[J]. 水利水电工程设计, 2007, 26 (3) : 26-29.
- WANG Ping. The problems and the improving suggestions for conventional calculation method of power generation dispatching drawings of reservoir[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2007, 26 (3) :26-29.
- [6] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C].//IEEE International Conf on Neural Networks.Perth(Australia): 1995: 1942-1948.
- [7] 吴月秋, 纪昌明, 王丽萍, 等. 基于混沌粒子群算法的水电站水库优化调度[J]. 人民黄河, 2008, 30 (11) : 96-97.
- [8] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化算法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [9] 李崇浩, 纪昌明, 李文武. 改进微粒群算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(2): 54-56.
- LI Chong-hao, JI Chang-ming, LI Wen-wu. Modified particle swarm algorithm and its application in reservoir operation optimization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(2): 54-56.
- [10] Hi Y, Eberhart R C. Empirical study of particle swarm optimization[C].//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: 1999 : 1945-1950.
- [11] Gaing Zwe-lee. Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment[C].//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Ontario(Canada): 2003: 418-424.

收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2009-12-09

作者简介:

杨子俊(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事水电开发利用等方面的研究。E-mail: zjyang-lee@163.com