

改进量子进化混合优化算法在溪洛渡电站机组组合中的应用研究

吉鹏¹, 周建中¹, 张睿¹, 刘志武², 卢鹏¹

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国长江电力股份有限公司, 四川 成都 610042)

摘要: 传统方法求解水电站机组组合问题时存在易陷入局部最优、易出现“维数灾”、收敛性差等缺陷, 因此提出了一种改进量子进化混合优化算法用以解决这一问题。通过将量子进化算法与基于经济运行总表的动态规划法嵌套, 分别对外层机组组合和内层负荷分配问题进行迭代优化; 同时, 引入最短开、停机时间修补策略和备用容量修补策略, 有效处理多重复杂约束, 在保证计算精度的前提下, 显著提高收敛速度。以溪洛渡电站经济运行中的机组组合问题为工程背景进行了实例研究, 并与已有 DP 和 IBPSO 方法进行对比分析, 结果显示所提算法简单高效, 优化效果好, 具有较强的工程实用性。

关键词: 量子进化; 动态规划; 机组组合; 修补策略; 负荷分配

Study of unit commitment in Xiluodu based on a hybrid optimization algorithm of improved quantum evolution algorithm

Ji Peng¹, Zhou Jian-zhong¹, Zhang Rui¹, Liu Zhi-wu², Lu Peng¹

(1. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. China Changjiang Electric Power Co., Ltd, Chengdu 610042, China)

Abstract: An improved quantum evolution algorithm is presented, which has better global optimization ability and faster convergence speed, because traditional methods have some problems, such as "disaster of dimension" problem, poor convergence performance and so on. The proposed method takes the improved QEA for the outer unit combination and the DP for inner economic load dispatch, the economic operation is solved by the two sub-problems alternating iterative optimization. Meanwhile, the minimum up/down time repair strategy and system reserve capacity repair technique are also used to deal with multiple complex constraints, which effectively improve the convergence speed on the premise of ensuring calculation precision. The proposed method is applied in solving unit commitment problem in Xiluodu Station. Compared with DP and IBPSO methods, the results show that this method is easier and faster, and has better global optimization ability with a strong practical engineering value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51239004 and No. 51109086).

Key words: quantum evolution algorithm(QEA); dynamic programming(DP); unit commitment; repair strategy; load dispatch

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0084-08

0 引言

溪洛渡水电站是我国金沙江水电基地正在新建的巨型水利枢纽, 总装机容量达 1 386 万 kW, 是中国第二大、世界第三大水电站。根据目前接入系

统的设计方案, 溪洛渡左、右岸分别供电国家电网和南方电网, 接受两个电网电力调度机构的调度管理(简称“一库两站两调”)。溪洛渡左岸电站主要供电华东地区, 接受国家电力调度中心调度, 右岸电站主送南方电网, 接受南方电网调度中心调度。溪洛渡水电站机组组合优化问题的研究不但可为其制定短期发电调度计划提供决策依据, 而且能指导电站最优化执行电网下达的发电任务, 对电力系统的安全优质运行具有重大意义。

水电站机组组合问题是电力系统安全经济运

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239004); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012); 水利部公益性行业科研专项(201001080); 国家自然科学基金青年科学基金(51109086)

行问题的重要分支, 包含机组间的最优化负荷分配和机组组合优化两个子问题, 要求在调度周期内合理安排机组启停次序、开机台数、台号, 实现水电站机组间负荷的最优分配, 使水电站运行达到时间和空间上的最优, 从而获得最大的经济效益。机组组合问题是一个高维数、非凸、离散、非线性的 NP-Hard 问题, 快速准确地找到全局最优解十分困难, 但由于其能带来显著的经济效益, 许多学者不断探索与研究, 并已取得了一定的研究成果^[1-3]。目前, 已用于机组组合优化问题求解的算法有: 优先顺序法^[4]、动态规划法^[5]等经典算法^[6-7]以及遗传算法^[8]、粒子群算法^[3,9-10]等随机启发式算法。上述方法在求解该问题时得到不同程度的应用, 但仍存在一定缺陷和不足: 优先顺序法对模型过于简化以致结果难于指导实际生产, 动态规划法存在“维数灾”的痼疾难以处理大规模系统, 粒子群算法对于机组开停机的离散问题直接求解难度较大等。负荷分配问题的解决方法目前已经较为成熟^[11], 动态规划算法、等微增率法、粒子群算法等因各自特点已成功应用于不同工程实践。

本文采用更适合组合问题求解的量子进化算法^[12-13]求解机组组合优化问题; 根据最优化原理推广定理, 即最优策略的任意子策略亦最优^[14], 将计算精度较高的动态规划算法应用于机组间负荷分配, 并且根据溪洛渡电站的实际情况对开停机修补策略、容量修补策略^[3]予以修正、应用, 使其更符合溪洛渡电站的实际运行要求。将提出的算法应用于溪洛渡电站的经济运行过程, 并与已有方法进行对比, 结果表明: 本算法收敛速度更快, 计算精度更高, 优化效果更好, 能够满足溪洛渡电站机组组合优化要求, 工程实用价值较高。

1 模型的数学描述

1.1 目标函数

水电站机组组合问题面临的主要任务是, 综合考虑电站安全可靠要求, 在满足水电站运行中各项约束条件的前提下, 采用“以电定水”的方法, 合理安排最优开、停机组合以及机组间负荷分配, 以达到耗水量最小的目标。其目标函数可用式(1)表示^[3]。

$$Q = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [Q_i^t(H_i^t, N_i^t) \Delta T u_i^t + u_i^t (1 - u_i^{t-1}) Q_{\text{on},i} + (1 - u_i^t) Q_{\text{off},i}] \quad (1)$$

式中: $H_i^t = H_{\text{gross}}^t - H_{\text{loss}}^t(Q_i^t)$; Q 为总发电耗水量 (m^3); $Q_i^t(H_i^t, N_i^t)$ 为第 t 时段第 i 台机组在净水

头为 H_i^t ; 出力为 N_i^t 情形下的发电流量 (m^3/s); H_{gross}^t 为第 t 时段电站毛水头 (m); $H_{\text{loss}}^t(Q_i^t)$ 为第 t 时段第 i 台机组在发电流量为 Q_i^t 时的水头损失 (m); ΔT 为时段时长 (s); u_i^t 为第 t 时段第 i 台机组的开停机状态, 开机时 $u_i^t = 1$, 停机时 $u_i^t = 0$; $Q_{\text{on},i}$ 为第 i 台机组的开机耗水量 (m^3/s); $Q_{\text{off},i}$ 为第 i 台机组的关机耗水量 (m^3/s); n 为电站机组台数; T 为调度时段数。

1.2 约束条件

电站机组组合问题的求解还需满足有功功率平衡、机组出力限制、系统备用容量约束、最小开、停机时间等约束条件。

(1) 电站负荷平衡约束

$$N(t) = N_1(t) + N_2(t) + \dots + N_i(t) + \dots + N_n(t) \quad (2)$$

式中: $N(t)$ 是在 t 时段内电站的总负荷; $N_i(t)$ 是在时段内负荷要求下第 i 台机组的出力。

(2) 旋转备用容量约束

$$\sum_{i=1}^n N_{i,\text{max}} - \sum_{i=1}^n N_i \geq N_{\text{min}} \quad (3)$$

式中: $\sum_{i=1}^n N_{i,\text{max}}$ 是机组装机容量总和; $\sum_{i=1}^n N_i$ 是机组出力总和; N_{min} 是电站的旋转备用容量下限。

(3) 各机组出力约束

$$N_{i,\text{min}} \leq N_i(t) \leq N_{i,\text{max}} \quad (4)$$

式中, $N_{i,\text{min}}$ 、 $N_{i,\text{max}}$ 是第 i 台机组的单机出力上、下限。

(4) 各机组发电流量约束

$$Q_{i,\text{min}} \leq Q_i(t) \leq Q_{i,\text{max}} \quad (5)$$

式中, $Q_{i,\text{min}}$ 、 $Q_{i,\text{max}}$ 是第 i 台机组的最小、最大发电流量。

(5) 机组最小开、停机时间约束

$$T_{i,\text{on}} \geq \underline{T}_{i,\text{on}} \quad \text{或} \quad T_{i,\text{off}} \geq \underline{T}_{i,\text{off}} \quad (6)$$

式中: $T_{i,\text{on}}$ 是第 i 台机组的开机时间; $\underline{T}_{i,\text{on}}$ 是第 i 台机组的开机时间下限; $T_{i,\text{off}}$ 是第 i 台机组的停机时间; $\underline{T}_{i,\text{off}}$ 是第 i 台机组的停机时间下限。

2 量子进化算法概述

量子进化算法 (QEA) 由 Han 等在 2002 年提出, 该算法利用量子理论中有关量子态的叠加和纠缠等特性, 引入量子交叉、变异和灾变等操作, 通过量子并行计算进行问题求解, 具有算法通用、种群规模小、全局寻优能力强、收敛速度快、易于与其他算法混合等优点^[12-13]。QEA 采用基于量子比特概念构造的量子染色体, 并利用当前最优染色体信

息,使用量子旋转门更新染色体。此外, QEA 利用量子的相干性,构造交叉算子执行变异策略来引导进化,使种群以大概率向着优良模式进化。

在量子进化算法中,最小信息单元为一个量子位(量子比特)^[13]。一个量子比特状态可取 0 或者 1,其状态可表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (7)$$

式中:复数 α 、 β 分别代表相应状态出现的概率 ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$); $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$ 分别表示量子比特处于状态 0 和 1 的概率。

第 k 代量子染色体种群为

$$Q(k) = \{q_0^k, q_1^k, \dots, q_l^k\} \quad (8)$$

式中: l 为种群大小; k 为进化代数; q_i^k 表示量子染色体, n 为量子染色体长度,定义为

$$q_i^k = \begin{bmatrix} \alpha_{i,0}^k & \alpha_{i,1}^k & \dots & \alpha_{i,n}^k \\ \beta_{i,0}^k & \beta_{i,1}^k & \dots & \beta_{i,n}^k \end{bmatrix} \quad i = 0, 1, \dots, l \quad (9)$$

3 溪洛渡电站机组组合优化模型求解

为实时、经济地将电站日负荷分配到电站各机组,本文将目标问题分解为内层负荷优化分配和外层机组组合优化两重子问题,采用量子进化算法(QEA)确定合适的开、停机组合,再利用动态规划算法(DP)进行机组间负荷分配;为使模型求解结果更符合电站的实际运行要求,采用了开、停机修补策略以及容量修补策略处理开、停机约束和旋转备用容量约束。

3.1 编码表示

根据溪洛渡电站实际情形,在满足归一化条件 ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$) 前提下初始化量子种群,每个量子中以 0 表示关机,1 表示开机,表达式如式(10)所示。

$$Q = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0^0 \\ \beta_0^0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \alpha_0^1 \\ \beta_0^1 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} \alpha_0^n \\ \beta_0^n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \alpha_1^0 \\ \beta_1^0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \alpha_1^1 \\ \beta_1^1 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} \alpha_1^n \\ \beta_1^n \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} \alpha_T^0 \\ \beta_T^0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \alpha_T^1 \\ \beta_T^1 \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} \alpha_T^n \\ \beta_T^n \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: Q 表示一个量子种群,每个量子种群表征各种可能的机组组合方式的概率空间; T 表示电站每日调度时段数; n 表示量子编码长度,也表示相应的机组台数。

为使算法获得更快的收敛速度,本文对初始化

方法进行了改进——按机组类型批量初始化。设定影响各类型机组开机与否的主要信息包括:机组动力性能,机组开机耗水量,机组健康(气蚀振动)状况等。本文在文献[11]的基础上,根据不同机组的综合状态给出开机评价值,进而获得相应的量子比特位。开机评价值的计算方法如下:

$$E_i = a_{i,1}e_{i,1} + a_{i,2}e_{i,2} + a_{i,3}e_{i,3} \quad (11)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 表示各类型机组相关状态评价的权重,由电厂人员经验值给定; $e_{i,j}$ 表示开机评价值; E_i 为各类型机组开机综合评价值,取值区间为[0,1], 0 表示绝对停机, 1 表示绝对开机。根据综合评价值计算出各类型机组开机概率:

$$\rho_i = \frac{E_i}{\sum E_i} \quad (12)$$

由机组的开机概率 ρ_i , 初始化相应类型机组,相应的量子比特位为 $[\sqrt{1-\rho_i}, \sqrt{\rho_i}]$ 。

通过量子观测,可以产生一组普通解 P , 亦即代表 T 时段 n 台机组机组组合状态的 0-1 编码,具体实现方式如下:随机产生一个遵循[0,1]均匀分布的实数 x , 若 $x > |\alpha|^2$, 则对应机组状态取 1, 即机组开机; 否则, 取 0, 即机组关机。

3.2 进化策略

3.2.1 变异策略

本文采用量子变换门矩阵实现量子种群的变异操作,对机组组合状态空间进行更新。量子旋转门的旋转角度表征量子的变异概率,变异算子定义如式(13),式中, $U(\theta_i)$ 表示量子旋转门,旋转变异的角度 θ_i 可以由表 1 得到。

$$\begin{cases} U(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = U(\theta_i) \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \\ \theta_i = S(\alpha_i, \beta_i) \Delta \theta_i \end{cases} \quad (13)$$

表 1 旋转变异的角计算对照表

Table 1 Rotation angle of variation

x_i	$best_i$	$f(x_i) > f(best_i)$	$\Delta \theta_i$	$S(\alpha_i, \beta_i)$			
				$\alpha_i \beta_i > 0$	$\alpha_i \beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i > 0$
0	0	假	0	0	0	0	0
0	0	真	0	0	0	0	0
0	1	假	0	0	0	0	0
0	1	真	0.01π	-1	1	± 1	0
1	0	假	0.01π	-1	1	± 1	0
1	0	真	0.01π	1	-1	0	± 1
1	1	假	0.01π	1	-1	0	± 1
1	1	真	0.01π	1	-1	0	± 1

表中 x_i 为当前时段第 i 台机组的开机状态; $best_i$ 为当前时段目标函数值最优情形下第 i 台机组的开机状态; $f(x)$ 为适应度函数, 即当前机组组合状态下发电耗水量; $\Delta\theta_i$ 为旋转角度的大小; $S(\alpha_i, \beta_i)$ 为旋转角度的方向。 $\Delta\theta_i$ 用于控制算法的收敛速度, $S(\alpha_i, \beta_i)$ 用以保证算法的收敛。

3.2.2 交叉策略

量子交叉的主要目的在于克服算法早熟, 减小算法陷入局部最优概率。本文在模型求解中根据量子的相干特性, 采用“全干扰交叉”, 按对角线将染色体重新排列、组合, 形成新的量子种群, 即新的机组组合概率空间。以下仅举一例略加说明: 调度时段数为 4 (种群数), 机组台数为 9 (染色体长度), 用大写字母代表交叉后获得的新机组组合 (染色体), 如: A(1)-A(2)-A(3)⋯A(9), 如表 2 所示。

表 2 全干扰交叉实例

Table 2 Example of full interference cross-instance

种群	染色体				
1	A(1)	D(2)	C(3)	⋯	A(9)
2	B(1)	A(2)	D(3)	⋯	B(9)
3	C(1)	B(2)	A(3)	⋯	C(9)
4	D(1)	C(2)	B(3)	⋯	D(9)

3.3 经济运行总表编制及负荷分配

针对溪洛渡电站机组数量多、容量大以及动态规划方法求解大规模问题效率低、速度慢的特点, 本文根据溪洛渡电站特性, 采用动态规划算法分别计算、整理出左、右岸电站所有机组开机情形下的最优负荷分配表, 即经济运行总表, 并将之存入数据库以备调用^[14]。在实际应用中, 依据不同负荷利用经济运行总表查询相应出力下分配情况; 若无法直接查出, 可采用线性插值。

采用以下顺向递推计算式

$$\begin{cases} Q_k^*(\overline{N}_k, H) = \min_{N_k \in R_k} [Q_k(N_k, H) + Q_{k-1}^*(\overline{N}_{k-1}, H)] \\ \overline{N}_{k-1} = \overline{N}_k - N_k (k=1, 2, \dots, n) \\ Q_0^*(\overline{N}_0, H) = 0 \quad \forall \overline{N}_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: \overline{N}_k 表示 1~ k 号机组总出力, 即第 k 阶段的总负荷; $Q_k^*(\overline{N}_k, H)$ 表示总负荷为 \overline{N}_k 、水头 H 条件下, 在 1~ k 号机组间优化分配负荷时的总发电流量; $Q_0^*(\overline{N}_0, H)$ 表示边界条件, 即在起始阶段以前耗流量为 0。

3.4 修补策略

本文采用的修补策略^[3]主要有两种: 1、机组最

短开停机时间修补策略; 2、系统备用容量修补策略。两种策略循环使用, 直到满足开停机时间约束以及备用容量约束, 将进化搜索中生成的不可行解调整为可行解, 加快了算法收敛速度。针对溪洛渡机组型号类型少、容量大的实际情形, 在应用容量修补策略时, 不再以各机组的平均满负荷耗流量值作为建立机组投、切优先顺序表的依据, 引入开机评价价值, 见式 (11), 按照评价价值由大到小的次序建立开停机优先顺序表。

3.5 模型求解流程

将本文方法应用于溪洛渡电站机组组合问题的求解步骤如下:

步骤一: 固定机组组合最优负荷分配

Step1: 初始化各个变量, 输入机组动力特性曲线、水头, 输入机组台数 n ;

Step2: 设定阶段变量, 即当前机组台数为 $k=1$;

Step3: 求取第 k 台机组出力上、下限以及当前阶段 k 台机组总出力的上、下限值;

Step4: 循环求出 k 阶段各种可能出力情形下总耗流量最优的负荷分配;

Step5: 判断状态变量 k 是否大于最大机组台数 n , 若是, 继续; 若否, 迭代次数 k 加 1, 转至 Step3;

Step6: 由递推方程求出所有可能出力情形下的最优负荷分配, 生成经济运行总表, 并存入数据库备查。

步骤二: 机组组合优化—量子进化算法应用

Step1: 设置量子规模 M , 随机初始化量子种群 Q , 设置最大迭代次数 K ; 输入机组动力特性曲线、初始启停状态、连续开、停机时长以及日负荷曲线; 设定当前迭代次数 $k=1$;

Step2: 进行量子观察, 生成代表机组组合的种群 P ;

Step3: 采用修补策略, 对 P 中每个个体进行修补, 使其满足开停机约束及备用容量约束;

Step4: 查询经济运行表, 求取各种开机组合下的负荷分配及总耗水量, 并选取耗水量最小的一组作为最优个体;

Step5: 进行交叉、变异等操作, 生成新的量子种群;

Step6: 判断当前迭代次数是否超过最大值 K , 若否, 则迭代次数加 1, 转至 Step2; 若是, 则停止计算。

具体流程如图 1 所示。

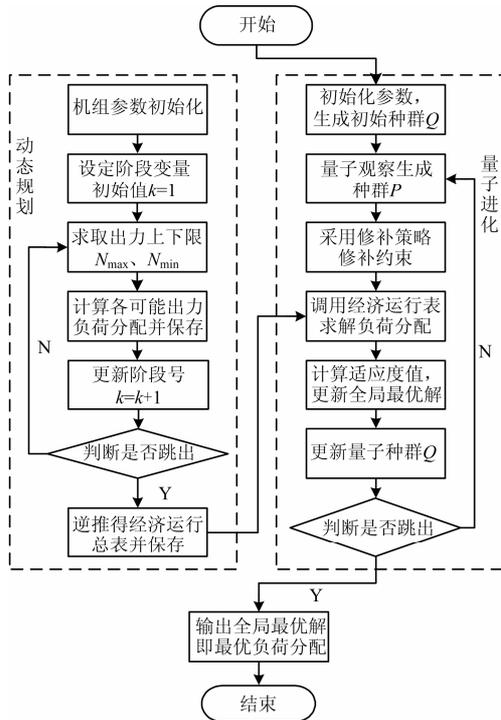


图 1 溪洛渡电站机组组合中 QEA&DP 应用流程图

Fig. 1 Flow chart of unit commitment with QEA&DP

4 实例应用

溪洛渡电站左、右岸各安装 9 台 77 万 kW 的水轮发电机组，总装机 1386 万 kW。溪洛渡电站水库总库容 128.0 亿 m³，调节能力极强，调度过程中水位日变幅较小。本文设定溪洛渡当日水头为其额定水头 197 m，将提出的方法应用于溪洛渡电站机组组合问题研究。考虑引用流量产生的水头损失，根据 NHQ 曲线拟合溪洛渡电站各型机组特性参数如表 3 所示。

表 3 机组性能参数

Table 3 Unit performance parameter

机组	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>P</i> _{max} / 万 kW	<i>P</i> _{min} / 万 kW
1#~6#	0.008 0	4.318 0	41.338 8	78.4	39.2
7#~9#	0.010 7	4.145 7	39.558 4	78.4	39.1
10#~18#	0.013 2	3.926 1	46.183 1	78.4	39.2

设定溪洛渡左、右岸电站日负荷曲线分别如图 2、图 3 所示。

设定量子规模 *M*=50，最大迭代次数 *K*=150，最大开、停机时间间隔均为 2 h，调度时段间隔为 1 h。计算求得的当日 24 时段情形下负荷分配情况，如表 4、表 5 所示。

采用本文所提的量子进化方法，分以下情况进行独立计算：

1) 保持量子规模为 50 不变，控制迭代次数为 10, 50, 100, 150, 200 分别进行计算，每种情形计算 500 次，并对计算结果中最优解的分布进行统计，如图 4 所示。

2) 保持迭代次数为 100 不变，控制量子规模为 5, 10, 50, 80, 100 分别进行计算，每种情形计算 500 次，并对计算结果中最优解的分布进行统计，如图 5 所示。

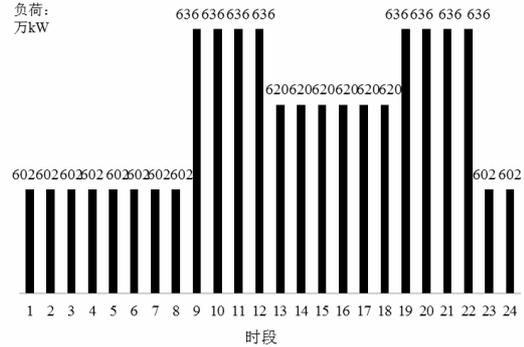


图 2 溪洛渡左岸日负荷曲线

Fig. 2 Daily load curve of Xiluodu left bank

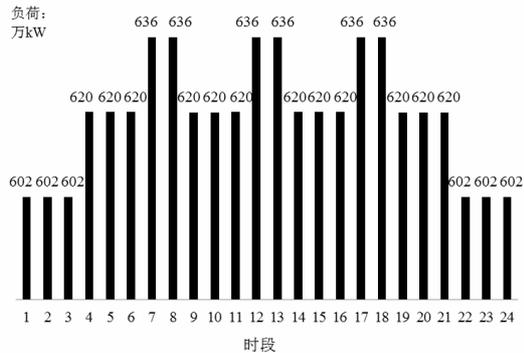


图 3 溪洛渡右岸日负荷曲线

Fig. 3 Daily load curve of Xiluodu right bank

表 4 左岸机组负荷分配

Table 4 Optimal results of left bank

时段	负荷/ 万 kW	左岸机组负荷分配/万 kW								
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
1~8	602	77	77	77	77	77	77	70	70	0
9~12	636	76	76	76	76	76	76	60	60	60
13~18	620	78	78	77	77	77	77	78	78	0
19~22	636	76	76	76	76	76	76	60	60	60
23~24	602	77	77	77	77	77	77	70	70	0

表 5 右岸机组负荷分配

Table 5 Optimal results of right bank

时段	负荷/ 万 kW	右岸机组负荷分配/万 kW								
		10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
1~3	602	77	75	75	75	75	75	75	75	0
4~6	620	78	78	78	78	78	78	76	0	76
7~8	636	71	71	71	71	71	71	70	70	70
9~11	620	78	78	78	78	0	78	78	76	76
12~13	636	71	71	71	71	71	71	70	70	70
14~16	620	78	78	78	78	78	78	76	76	0
17~18	636	71	71	71	71	71	71	70	70	70
19~21	620	78	78	78	78	0	78	78	76	76
22~24	602	77	75	0	75	75	75	75	75	75

注：左右岸总耗水量为 5.868220 亿 m³。

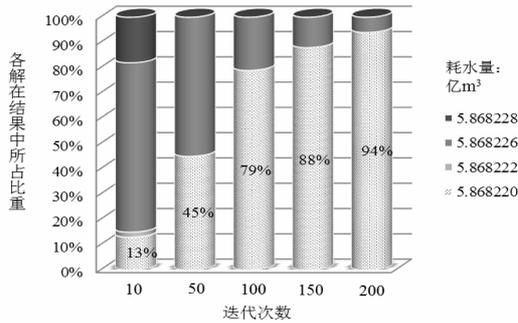


图 4 不同迭代次数下最优解分布

Fig. 4 Optimal solution in different iterations

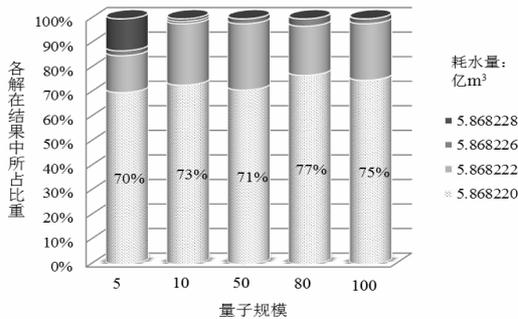


图 5 不同量子规模下最优解分布

Fig. 5 Optimal solution in different quantum sizes

经过统计分析可以发现：在量子规模一定的情形下，随着迭代次数的增加，计算搜索到最优解的可能性不断增大；在迭代次数一定的情形下，量子规模的改变对搜索得到最优解的影响不是很大，但是依然可以较大概率的搜索获得全局最优解。

相应的，采用文献[3]的方法在相同计算条件下进行仿真计算，结果分别如图 6、图 7 所示。

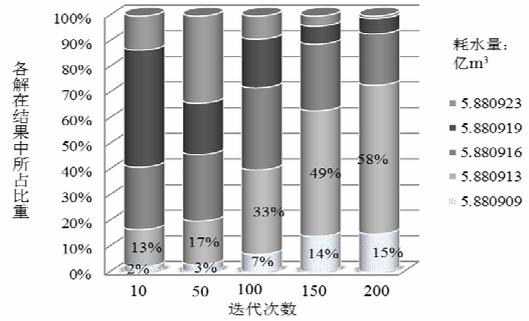


图 6 不同迭代次数下最优解分布

Fig. 6 Optimal solution in different iterations

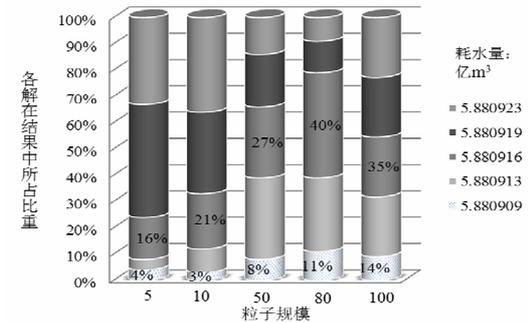


图 7 不同量子规模下最优解分布

Fig. 7 Optimal solution in different quantum sizes

经过统计分析可以发现，对于文献[3]中方法，由于在本文算例中型号相同机组数量较多，局部最优解数量及存在概率增大，而研究 IBPSO 算法机制可以发现，该算法局部搜索能力很强，而全局搜索能力很弱^[15]，对于多极值问题求解不易。量子规模和迭代次数的增加，并不能显著提高算法的寻优能力，此算法易陷入局部最优。

另外，为了验证本文方法的计算效率以及有效性，在初始条件相同的情况下，分别采用动态规划 (DP) 算法 (20 MW 步长)，IBPSO 算法以及本文的 QEA&DP 算法分别连续运行 500 次，对其结果进行比较，如表 6 所示。

表 6 各方法计算结果比较

Table 6 Comparison of optimal results among three methods

求解方法	总耗水量/亿 m ³			平均计算 时间/s
	最优解	平均解	最差解	
DP	5.900 321	—	—	131.8
IBPSO	5.880 909	5.880913	5.880 923	8.2
QEA&DP	5.868 220	5.868221	5.868 228	6.1

本文所提算法应用于溪洛渡电站机组组合问题求解，收敛速度快，求解精度高，可以较容易地搜索得出全局最优解，使得水电站运行周期内的耗

水量下降,有效提高了水能利用率,有效避免了陷入局部最优、计算效率低下等问题。由表 6 所示的结果中可以看出,量子进化算法优化所得的最优耗水量为 5.868 亿 m^3 ,优于 DP 和 IBPSO 算法的结果,并且在计算速度上有一定的优势。

5 总结

本文提出了一种改进量子进化结合动态规划的算法用于求解溪洛渡电站机组组合问题。使用量子进化算法求解机组开停的 0-1 组合优化问题,改进、优化了初始种群获取方式以及交叉、变异策略;在求解机组间负荷优化分配问题时采用了查取经济运行总表的方法,既保证了计算的准确性又兼顾时效性;同时引入了启发式修补策略,对开停机策略以及备用容量约束进行修补。对比已有方法计算结果,本文提出的方法不仅收敛迅速,而且克服了原始算法易收敛于局部最优的缺陷,对于解决水电站机组组合问题是一次有益的探索。

参考文献

- [1] 陈皓勇,王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51-56.
CHEN Hao-yong, WANG Xi-fan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(4): 51-56.
- [2] 黎静华,韦化. 基于模式搜索算法的电力系统机组组合问题[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 121-128.
LI Jing-hua, WEI Hua. A general pattern search algorithm for electric power system unit commitment problems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 121-128.
- [3] 王永强,周建中,覃晖,等. 基于改进二进制粒子群与动态微增率逐次逼近法混合优化算法的水电站机组组合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 64-69.
WANG Yong-qiang, ZHOU Jian-zhong, QIN Hui, et al. Hydroelectric unit commitment optimization based on improved BPSO algorithm combined dynamic successive approximation method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 64-69.
- [4] 黎静华,兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 1-7.
LI Jing-hua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 1-7.
- [5] 王成文,韩勇,谭忠富,等. 一种求解机组组合优化问题的降维半解析动态规划方法(英文)[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 110-116.
WANG Cheng-wen, HAN Yong, TAN Zhong-fu, et al. Dimension-reduced semi-analytical dynamic programming approach for solving unit commitment problem (English)[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 110-116.
- [6] 李刚,程春田,曾筠,等. 改进等微增率算法求解火电负荷分配问题的实用化研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 72-76.
LI Gang, CHENG Chun-tian, ZENG Yun, et al. Practical study and application of thermal load distribution solved by improved equal incremental principle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 72-76.
- [7] 许丹,夏少连,丁强,等. 基于启发式混合整数规划法求解大规模机组组合问题[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 1-6, 13.
XU Dan, XIA Shao-lian, DING Qiang, et al. Fast unit commitment based on heuristic mixed integer programming[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 1-6, 13.
- [8] 麻秀范,崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiu-fan, CUI Huan-jun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [9] 李颖浩,郭瑞鹏. 求解机组组合问题的多种群混沌蚁群算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 13-17.
LI Ying-hao, GUO Rui-peng. Unit commitment solved by multi colony chaotic ant optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 13-17.
- [10] 何怡刚,祝文姬,周炎涛,等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 163-171.

- HE Yi-gang, ZHU Wen-ji, ZHOU Yan-tao, et al. An analog circuit diagnosis method based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 163-171.
- [11] 程淑, 李承军. 梯级水电站 AGC 的实现方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(9): 106-108.
- CHENG Shu, LI Cheng-jun. Study on realization method of AGC (automatic generation control) in cascade hydropower station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2004(9): 106-108.
- [12] 王凌. 量子进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1321-1326.
- WANG Ling. Advances in quantum-inspired evolutionary algorithms[J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1321-1326.
- [13] 魏娜, 黄学宇, 刘守东. 量子进化算法原理及改进策略研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(20): 223-229.
- WEI Na, HUANG Xue-yu, LIU Shou-dong. Research on principle and improved strategy of quantum evolutionary algorithm[J]. Computer Engineering, 2011, 37(20): 223-229.
- [14] 张勇传. 水电站经济运行原理[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- ZHANG Yong-chuan. Economic operation of hydroelectric plant[M]. Second Edition. Beijing: China Water Power Press, 1998.
- [15] 刘建华, 杨荣华, 孙水华. 离散二进制粒子群算法分析[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2011, 47(5): 504-514.
- LIU Jian-hua, YANG Rong-hua, SUN Shui-hua. The analysis of binary particle swarm optimization[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2011, 47(5): 504-514.

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-09-10

作者简介:

吉 鹏 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水电站自动发电控制, 厂内经济运行; E-mail: jiphust@gmail.com

周建中 (1959-), 男, 通讯作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为水电能源及其复杂系统分析的先进理论与方法, 发电生产过程控制、诊断与仿真; E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

张 睿 (1987-), 男, 博士研究生, 从事水电能源优化运行的研究。