排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2011 年 3 月 Mar. 2011 | 第 29 卷 第 2 期 Vol. 29 No. 2

doi: 10.3969/j.issn.1674 - 8530.2011.02.008

大型泵站运行优化方法及其应用

冯晓莉，仇宝云，杨兴丽，申　剑，裴　蓓
（扬州大学能源与动力工程学院，江苏 扬州 225127）

摘要： 为了掌握适于求解具有多变量的大型泵站运行优化问题的现代优化方法，阐述了遗传算法（GA）、基本粒子群算法（PSO）与模拟退火粒子群算法（SA - PSO）的基本原理，分析了算法的异同点，从理论上得出 PSO 算法较 GA 算法更简单、更高效. 以南水北调东线工程江都泵站系统为例，当泵装置扬程一定时，以各座泵站开机台数和水泵叶片角度为变量，运行费用最少为目标函数，并且满足总抽水流量、单机允许抽水流量以及开机台数等约束条件，建立运行方案优化数学模型，确定各座泵站开机台数、机组运行工况和日运行费用. 分别采用遗传算法、基本粒子群算法和模拟退火粒子群算法求解，可行性规则处理约束条件，应用 Matlab 语言编制优化计算程序. 结果表明：SA - PSO 算法求解的泵站变角优化运行方案，较在设计角度运行的方案节省运行费用 0.99% ~4.22%，较 GA，PSO 算法最优解方案分别节省运行费用 0.22% ~2.80% 和 0.02% ~0.40%；3 种算法的运算时间分别为 30，52，25 s. 因此，SA - PSO 算法较为适合于大型泵站运行优化问题的求解.

关键词： 大型泵站；运行方案；优化方法；遗传算法；基本粒子群算法；模拟退火粒子群算法
中图分类号： S277.9；TV675　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1674 - 8530(2011)02 - 0127 - 06

Optimal methods and its application of large pumping station operation

Feng Xiaoli, *Qiu Baoyun*, *Yang Xingli*, *Shen Jian*, *Pei Bei*
(School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: In order to master modern optimal methods, which are suitable for solving large pumping station optimal operation with multivariables. Basic principles of genetic algorithms (GA), particle swarm optimization (PSO) and simulated annealing-particle swarm optimization (SA - PSO) were introduced, and the similarities and differences were analyzed. It is concluded that PSO is more simple and efficient than GA. Taking Jiangdu pumping station system in Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project as an example, under the circumstances of certain pump assembly head, selecting the number of running pump units and blade setting angles of water pumps as variables, optimal mathematical models for pumping station operation schemes were established aiming at the least operation cost, meeting the constraint conditions such as total pumping discharge, allowed discharge of single pump and the number of running pump units. GA, PSO and SA - PSO were applied to solve the models respectively to determine the number of running pump units, operation duties of pump units and daily operation cost of each pumping station. Constraint conditions were used to deal with feasible rules, and calculating procedure was programmed with Matlab. The results indicate that the operation costs of the optimum

收稿日期： 2010 - 08 - 07
基金项目： 全国百篇优秀博士学位论文作者专项基金资助项目（2007B41）；江苏省水利科技重点项目（2008048）
作者简介： 冯晓莉（1982—），女，江苏仪征人，讲师，博士（fxlyzdx821@sina.com），主要从事水泵与泵站工程研究.
仇宝云（1962—），男，江苏扬州人，教授，博士生导师（通信作者，yzdxqby@sohu.com），主要从事水泵与泵站工程研究.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

schemes by adjusting pump blade setting angles with SA – PSO are 0.99% –4.22% less than that of the conventional schemes under design blade angles, and among the three optimum schemes, the operation cost of the optimum scheme based on SA – PSO is about 0.22% –2.80%, 0.02% –0.40% less than that based on GA and PSO respectively. Computing times of the three optimizing algorithms are 30, 52 and 25 s respectively. Therefore, SA – PSO is more suitable for solving large pumping station operation optimization problems.

Key words: large pumping stations; operation schemes; optimization methods; genetic algorithms; particle swarm optimization; simulated annealing-particle swarm optimization

泵站运行时需消耗大量的能源. 在能源日趋紧缺的今天,泵站优化运行问题越来越受到泵站设计部门和管理部门的重视. 用于求解泵站运行优化问题的方法主要有动态规划法[1]、遗传算法[2-3]以及其他现代优化算法[4-7]等. 但动态规划法必须将递推过程中的状态变量离散点存储于计算机内存中,当离散点较多时,所占计算机内存较大; 此外,许多不可能是最优策略的机组组合也需要计算,增加了计算量. 现代优化方法例如遗传算法和粒子群算法克服了上述缺点,在计算过程中只需保留当前最优解,减少了计算机内存使用量,提高了计算速度. 但是它们最初不是产生于泵站优化运行,需要根据泵站优化运行的特点加以改进和完善.

文中主要分析了遗传算法(GA)、基本粒子群算法(PSO)以及模拟退火粒子群算法(SA – PSO)的机理,并将其应用于求解大型泵站运行优化问题,寻找出更适合于求解大型泵站运行优化问题的方法.

1 遗传算法与粒子群算法的基本原理

1.1 遗传算法

遗传算法(GA)的基本思想来源于达尔文(Darwin)的进化论和孟德尔(Mendel)的遗传学说. 达尔文的进化论认为: 每一物种在不断的发展过程中都是越来越适应环境的; 物种中每个个体的基本特征被后代继承,但后代又不完全同于自己的父代; 在个体的生存与发展中,那些更能适应环境的个体特征能被保留下来,体现了适者生存的原理. 孟德尔的遗传学认为: 遗传以基因的形式包含在染色体中,每个基因有特殊的位置并控制某个特殊的性质,而由每个基因产生的个体对环境有一定的适应性; 通过基因杂交和基因突变可能产生对环境适应性强的后代,并通过优胜劣汰的自然选择,适应值高的基因被保存下来.

Holland 等人综合了上述两种学说的基本思想,提出了遗传算法. 该算法借助于计算机编程,将待求问题表示成个体,初始产生一个种群,根据适者生存的原则,从种群中选择出适应环境的个体,通过交叉、变异操作产生适应环境的新个体,经过一代一代遗传下去,最后收敛到一个最适应环境的个体,从而求得问题的最优解.

1.2 基本粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)的基本思想源于对鸟群捕食行为的研究[8]. 该算法将优化问题的搜索空间类比于鸟类的飞行空间,每只鸟被抽象为一个无质量、无体积的粒子,每个粒子都有一个由优化函数决定的适应值来衡量粒子的优劣,粒子的速度决定它们的飞行方向和距离,粒子的位置表示优化问题的可能解,最优解等同于要寻找的食物. 对于 n 维搜索空间,算法首先随机初始化粒子群的位置和速度,第 k 个粒子的位置可表示为 $\boldsymbol{X}_k = [x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{kn}]$,速度可表示为 $\boldsymbol{V}_k = [v_{k1}, v_{k2}, \cdots, v_{kn}]$. 然后根据适应度函数评价每一个粒子,得到 t 时刻粒子个体的最优位置 $\boldsymbol{P}_k = [p_{k1}, p_{k2}, \cdots, p_{kn}]$ 和群体最优位置 $\boldsymbol{P}_g$,利用式(1)和(2)分别对粒子的速度和位置迭代更新,每个粒子根据自身的飞行经验和群体的飞行经验来动态调整自己的飞行轨迹,向最优点靠拢.

$$\boldsymbol{V}_k(t+1) = w\boldsymbol{V}_k(t) + c_1 r_1(\boldsymbol{P}_k(t) - \boldsymbol{X}_k(t)) + c_2 r_2(\boldsymbol{P}_g(t) - \boldsymbol{X}_k(t)), \quad (1)$$

$$\boldsymbol{X}_k(t+1) = \boldsymbol{X}_k(t) + \boldsymbol{V}_k(t+1), \quad (2)$$

以上式中: w 为惯性权重因子; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数; 粒子速度 $\boldsymbol{V}_k$ 的第 j 维速度 v_{kj}($j = 1, 2, \cdots, n$)通常应受到速度最大值 $v_{\max}$ 的限制,一般设置为变量区间的 10% ~ 20%. 式(2)中,等式右边第 2 项略去了因数 $[t+1) - t]$.

1.3 模拟退火粒子群算法

模拟退火优化算法[9](SA)是一种模拟高温金属降温热力学过程的算法. 算法首先确定初始温度,随机选择一个初始状态并计算目标函数值; 对当前

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

状态附加一个小扰动，重新计算目标函数值. 算法以概率 1 接受较好点，以某种概率 P_a 接受较差点，直到系统冷却. 其关键步骤：在最小化目标 $f(x)$ 时，x 为当前解，x' 为 x 邻域产生的新解，令 $\Delta E = f(x') - f(x)$，则 x' 代替 x 成为新解的概率为 $P_a = \min\{1, \exp(-\Delta E/\theta)\}$，其中 θ 为温度参数. 显然，若 $f(x') < f(x)$ 时，$P_a = 1$，算法以概率 1 接受好的解；若 $f(x') > f(x)$，P_a 为 0 ~ 1 之间的数值，即算法以一定概率接受差的新解，从而使算法具有跳出局部最优解的能力. 在初始温度足够高、温度下降足够慢的条件下，算法能以概率 1 收敛到全局最优值.

PSO 算法早期收敛速度快，但是后期受随机振荡的影响，在全局最优值附近需要较长的搜索时间，收敛速度慢，容易陷于局部极小值. 在每个粒子的速度和位置更新过程中引入模拟退火算法，对种群进化后的适应值按 Metropolis 准则接受优化解的同时，概率接受恶化解，算法从局部极值区域中跳出. 自适应调整退火温度，随着温度逐渐下降，粒子逐渐形成低能量基态，收敛至全局最优解.

模拟退火粒子群算法(SA - PSO)，既保持了粒子群优化算法简单容易实现的特点，又改善了粒子群优化算法摆脱局部极值点的能力，提高了算法的收敛速度和精度.

2　遗传算法与粒子群算法特点

2.1　GA 算法和 PSO 算法的相同点

1) 两者都属于仿生算法. GA 算法主要借用生物进化中“适者生存”的规律；PSO 算法主要模拟鸟类觅食的社会行为.

2) 两者都属于全局优化方法. 在解空间中都随机产生初始种群，因而算法在全局解空间中进行搜索，且将搜索重点集中在性能高的部分.

3) 两者都属于随机搜索算法. GA 算法的遗传操作均属随机操作；PSO 算法中个体认知项和社会认知项前都有随机数.

4) 隐含并行性. 两种算法都是从解的一个集合开始搜索的，而不是从单个个体开始，具有隐含并行搜索特性，减小了陷入局部极值的可能性.

5) 不受函数约束条件的限制，例如连续性等.

6) 对高维复杂问题，往往存在早熟和收敛性能差的缺点，都无法保证收敛到最优点.

2.2　GA 算法和 PSO 算法的不同点

1) GA 算法中经过遗传操作后的种群优良模式可能被破坏，而且在算法结束时，只能得到最后一代个体的信息，前面迭代的信息没有保留. PSO 算法有记忆，性能较优的粒子都被保存，在算法结束时每个粒子仍然保持着其个体极值.

2) 两种算法的信息共享机制不同. GA 算法中染色体共享信息，整个种群较均匀地向最优区域移动. PSO 算法中只将全局极值或个体极值信息传递给其他粒子，是单向信息流动，整个搜索更新过程跟随当前最优解的过程.

3) GA 算法的编码技术和遗传操作比较复杂. PSO 算法相对于 GA 算法，没有交叉和变异操作，粒子只是通过内部速度进行更新，因此，原理更简单，参数更少，实现更容易.

4) PSO 算法相对于 GA 算法，对种群大小不十分敏感，即种群数目下降时性能下降不明显.

因此相比而言，PSO 算法保留了基于种群的全局搜索策略，避免了复杂的遗传操作，是一种更高效的搜索算法.

3　典型泵站运行优化

大型泵站系统输入功率包括主电动机输入功率、站用电能耗、输电能量损失和变压器能量损失等. 其中，站用电能耗、输电能量损失和变压器能量损失均与主机组运行工况及开机台数有关.

以南水北调东线江都 4 座并联泵站系统为例，当泵装置扬程分别为 7 m 和 4 m，总抽水流量为 350 m^3/s，电价 0.829 元/(kW·h) 时，确定各座泵站系统开机台数、水泵叶片角度及日运行费用. 江都 4 座并联泵站机组主要性能参数见表 1，表中 M 为装机台数，Q_T 为总装机流量，P_T 为总装机容量，H_s 为设计扬程.

表 1　江都站泵机组性能参数

Tab. 1　Performance parameters of pump units in Jiangdu pumping station

站名	泵型	M/台	Q_T/($m^3 \cdot s^{-1}$)	P_T/kW	H_s/m
一站	1.75ZLQ-7	8	80	8 000	7.8
二站	1.75ZLQ-7	8	80	8 000	7.8
三站	2000ZLQ13.5-7.8	10	135	16 000	7.8
四站	2900ZLQ30-7.8	7	210	23 800	7.8

3.1　数学模型建立与求解

在总抽水流量 Q_z 一定的情况下，以泵站系统总运行费用最少为准则，同时满足相关约束条件，建立如下模型.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1) 目标函数:

$$F = \min\left[\sum_{i=1}^{4}\left(\frac{\rho g Q_i H_z m_i}{1\,000\eta_{zi}\eta_{\mathrm{dri}}\eta_{\mathrm{mot}\,i}} + P_{zni} + \Delta P_{\mathrm{te1}i}\right) + \sum_{j=1}^{2}\Delta P_{\mathrm{bj}} + \Delta P_{\mathrm{te2}}\right]\cdot t_y e \times 10^{-4}, \quad (3)$$

式中: F 为泵站系统运行费用,万元; ρ 为水的密度, kg/m^3; g 为重力加速度, m/s^2; H_z 为泵装置扬程, m; i 为机组型号种类序号; Q_i 为第 i 种型号机组抽水流量, m^3/s; m_i 第 i 种型号机组开机台数; η_{zi} 为第 i 种型号机组泵装置效率; η_{moti} 为第 i 种型号机组电动机效率; η_{dri} 为第 i 种型号机组传动效率; P_{zni} 为站用电能耗, kW; $\Delta P_{\mathrm{te1}i}$ 为主变压器低压侧输电能耗, kW; j 为主变压器型号数; ΔP_{bj} 为第 j 种型号主变压器能耗, kW; ΔP_{te2} 为主变压器高压侧输电能耗, kW; t_y 为机组运行时间, h; e 为电价,元 /(kW·h).

2) 约束条件:

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{4} Q_i n_i = Q_z,\\ Q_{i,\min} \leqslant Q_i \leqslant Q_{i,\max},\\ \alpha_{i,\min} \leqslant \alpha_i \leqslant \alpha_{i,\max},\\ m_i \leqslant M_i,\end{cases} \quad (4)$$

式中: i, Q_i, m_i 意义同式(3); Q_z 为总抽水流量, m^3/s; $Q_{i,\min}$, $Q_{i,\max}$ 为第 i 种型号机组单台机组所允许的最小、最大抽水流量, m^3/s; α_i 为第 i 种型号机组水泵叶片角度,(°); $\alpha_{i,\min}$, $\alpha_{i,\max}$ 为第 i 种型号机组所允许的水泵最小、最大叶片角度,(°); M_i 为第 i 种型号机组装机台数.

上述数学模型是一个带有等式约束和不等式约束的非线性优化问题. 分别采用 GA, PSO 和 SA - PSO 对江都泵站系统进行运行优化计算,可行性规则处理约束条件, Matlab 语言编制计算程序.

3 种算法选取种群规模 200,最大迭代次数 300 代,独立运行 50 次. 遗传算法采用浮点编码、轮盘选择、算术交叉和非均匀变异. PSO 算法和 SA - PSO 算法中惯性权重因子 w 按式(5) 计算,对于适应度函数值优于平均值的粒子,将对应于较小的惯性权重,使该粒子得到保护; 对于适应度函数值差于平均值的粒子,将对应于较大的惯性权重,使该粒子更快地趋向于较好的搜索空间. 学习因子 c_1 和 c_2 按式(6) 计算[10]. 在优化的初始阶段,种群需要较大的自我学习能力和较小的社会学习能力,让粒子具有更大范围的搜索能力; 而在优化后期,粒子需要更大的社会学习能力与较小的自我学习能力,使粒子向全局最优解逼近. 模拟退火算法中初始温度 $\theta_0 = -(f_{\max} - f_{\min})/\ln 0.1$,退火速率 0.92,搜索步长 0.01. 模拟退火粒子群算法中,根据可行性规则更新粒子的最优位置和种群的最优位置,并在更新种群的全局最优位置采用模拟退火策略进行局部搜索,帮助种群跳出局部极小值.

$$w = \begin{cases} w_{\min} + \dfrac{(w_{\max} - w_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\mathrm{av}} - f_{\min}}, & f \leqslant f_{\mathrm{av}},\\ w_{\max}, & f > f_{\mathrm{av}},\end{cases} \quad (5)$$

式中: $w_{\max}$, $w_{\min}$ 分别为惯性权重因子 w 的最大值和最小值,取为 1.5 和 0.01; f, f_{av}, $f_{\min}$, $f_{\max}$ 分别为粒子适应度函数值、种群所有粒子平均值、最小值和最大值.

$$\begin{cases} c_1 = \dfrac{(c_{1\min} - c_{1\max})G}{G_{\max}} + c_{1\max},\\ c_2 = \dfrac{(c_{2\max} - c_{2\min})G}{G_{\max}} + c_{2\min},\end{cases} \quad (6)$$

式中: $c_{1\min}$, $c_{1\max}$, $c_{2\min}$, $c_{2\max}$ 分别为学习因子 c_1, c_2 的最小值和最大值,取 $c_{1\max} = c_{2\max} = 2.5$, $c_{1\min} = c_{2\min} = 0.5$; G 为当前迭代次数; $G_{\max}$ 为最大迭代次数.

3.2 计算结果分析

不同优化算法求解得到的江都站系统日运行费用及优化运行方案见表 2,3,表中 H_z 为装置扬程, F 为运行费用, t_c 为程序计算时间, m 为开机台数, α 为叶片角度.

表 2 中,各种算法独立运行 50 次所得到的目标函数值中,目标函数值(即江都站系统日运行费用)最低时对应的系统运行方案为最优解,目标函数值最高时对应的系统运行方案为最差解. 将目标函数值分别取算术平均和标准偏差,可得到平均值和标准偏差. 平均值越小,算法搜索的平均性能越好; 标准偏差越小,说明算法偏离平均解的程度越小,收敛性越好. 由表 2 还可见, SA - PSO 算法搜索的最优解、平均解、最差解以及标准偏差均好于其他算法. GA 算法运算时间最长, PSO 算法运算时间最短,前者约为后者的两倍; SA - PSO 算法运算时间稍长于 PSO 算法. 泵站系统最优运行方案通常只有 1 个,对应的运行费用最少,而现代优化方法求得的是接近最优解的优化解,优化解有多个. 虽然多个优化解的值彼此接近,但优化方案可能彼此相差很大(例如表 3 中的开机台数和叶片角度).

在设计角度(0°) 下,当装置扬程一定时,各站单机流量可根据泵装置性能确定; 各站抽水流量可根据各站装机流量占总装机流量的比例分配系统总

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

抽水流量，从而确定出各站开机台数. 由于需要同时满足机组在设计角度下运行以及总抽水流量的要求，所以计算出的开机台数为非整数，在实际运行中，可将开机台数向上取整，通过调节其中一台机组的运行时间实现总抽水量的平衡. 设计角度下江都站系统运行方案见表 4，表中各符号含义同表 3.

表 2　基于不同优化算法的江都站系统日运行费用

Tab. 2　Daily operation cost of Jiangdu pumping station system based on different optimal methods

H_z/m	方法	F/万元				t_c/s
		最优解	平均解	最差解	标准偏差	
7	GA	65.720 6	66.304 5	67.712 5	0.394 6	52
	PSO	65.592 6	65.816 5	66.296 0	0.153 1	25
	SA－PSO	65.578 2	65.681 1	66.157 8	0.104 7	30
4	GA	44.454 7	45.686 8	48.109 7	0.844 4	52
	PSO	43.385 3	44.543 7	45.963 1	0.540 2	25
	SA－PSO	43.210 1	43.858 9	44.828 5	0.369 3	30

表 3　基于不同优化算法的江都站系统优化运行方案

Tab. 3　Optimal operation schemes of Jiangdu pumping station system based on different optimal methods

H_z/m	方法	一站		二站		三站		四站		F/万元
		m/台	α/(°)	m/台	α/(°)	m/台	α/(°)	m/台	α/(°)	
7	GA	2	－1.19	4	0.99	3	－0.99	7	－0.57	65.720 6
	PSO	4	1.00	6	－0.47	0	—	7	－0.15	65.592 6
	SA－PSO	4	－0.04	6	－0.04	0	—	7	－0.09	65.578 2
4	GA	7	－0.20	5	－3.06	3	－0.65	4	－0.30	44.454 7
	PSO	8	－3.06	7	－2.86	0	—	5	－2.62	43.385 3
	SA－PSO	8	－4.00	8	－4.00	0	—	5	－3.32	43.210 1

表 4　设计角度下江都站系统运行方案

Tab. 4　Operation schemes of Jiangdu pumping station system at design pump blade angles

H_z/m	一站		二站		三站		四站		F/万元
	m/台	α/(°)	m/台	α/(°)	m/台	α/(°)	m/台	α/(°)	
7	5.91	0	5.91	0	6.51	0	3.96	0	66.233 5
4	4.88	0	4.88	0	5.52	0	3.41	0	45.112 5

不同优化算法求解得到的江都站系统运行费用比较如表 5 所示，表中 F_1，F_2，F_3 表示分别采用 GA，PSO，SA－PSO 优化算法计算得出的泵站系统运行费用，F_4 表示在设计角度运行时泵站系统运行费用. 可以看出，3 种方法优化结果中，SA－PSO 算法得到的解更接近于最优解，分别较 GA 和 PSO 算法节约运行费用 0.22% ~2.80% 和 0.02% ~0.40%. 泵站装置扬程为 7 m 和 4 m，在设计角度运行时的泵站系统运行费用分别为 66.233 5 万元和 45.112 5 万元，则泵站实施变角优化运行后，运行费用可节约 0.99% ~4.22%. 因此，SA－PSO 算法更适合于泵站运行优化问题的求解.

表 5　基于不同优化算法的江都站系统优化运行费用比较

Tab. 5　Comparison on operation cost of Jiangdu pumping station system based on different optimal methods

H_z/m	GA	PSO	SA－PSO	F_4/万元	运行费用比较/%		
	F_1/万元	F_2/万元	F_3/万元		$(F_1-F_3)/F_1$	$(F_2-F_3)/F_2$	$(F_4-F_3)/F_4$
7	65.720 6	65.592 6	65.578 2	66.233 5	0.215	0.021	0.988
4	44.454 7	43.385 3	43.210 1	45.112 5	2.800	0.404	4.217

4　结　论

现代智能优化方法为大型泵站运行优化问题的求解提供了一种新的思路和解决方法. 采用遗传算法、基本粒子群算法以及模拟退火粒子群算法，求解典型大型泵站运行优化问题，验证了 3 种算法的有效性. 不同方法优化解存在差异，优化方案相差很

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大. 对于算例泵站,当泵站装置扬程为 7 m 和 4 m 时,泵站变角优化运行较在设计角度运行可节约运行费用 0.99% ~4.22%. SA - PSO 算法求解得到最优解优于其他两种算法,更适合于泵站运行优化问题求解. 今后还需研究 SA - PSO 算法求解复杂梯级泵站系统运行优化问题的有效性.

参考文献(References)

[1] 陈媛媛,吴先策,纪荣亮. 动态规划法在西南管道泵站优化运行中的应用[J]. 油气储运,2009,28(8):13-15.
Chen Yuanyuan, Wu Xiance, Ji Rongliang. Application of dynamic programming theory in optimized operation of pump station over west-south oil product pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2009, 28(8): 13-15. (in Chinese)

[2] Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Cao Haihong, et al. Optimal operation for Baoying pumping station in East Route Project of South-to-North Water Transfer [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(1): 78-83.

[3] Xin Kunlun, Liu Suiqing, Tao Tao, et al. Application of pseudo-parallel genetic algorithm in optimal operation of multisource water supply network [C] // *Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*. Cincinnati, Ohio, USA. Reston: ASCE, 2007: 163.

[4] 鄢碧鹏,成 立. 供水泵站优化运行的混沌算法[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):56-58.
Yan Bipeng, Cheng Li. Optimal operation of water-supply pumping station by chaos [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(1): 56-58. (in Chinese)

[5] Pulido-Calvo I, Gutiérrez-Estrada J C, Asensio-Fernández R. Optimal design of pumping stations of inland intensive fishfarms [J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(3): 283-291.

[6] Zecchin A C, Simpson A R, Maier H R, et al. Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 44(5/6): 451-468.

[7] Ostfeld A, Tubaltzev A. Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2008, 134(2): 107-118.

[8] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway: IEEE Service Center, 1995, IV: 1942-1948.

[9] 康立山,谢 云,尤矢勇,等. 非数值并行算法(第 1 册):模拟退火算法[M]. 北京:科学出版社,1994.

[10] Ratnaweera A, Halgamuge S K, Watson H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients [J]. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 240-255.

(责任编辑 张文涛)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net