

# 泵站单机组变角运行优化方法对比研究

盛 喆

(中移(苏州)软件技术有限公司, 江苏 苏州 215153)

**摘要:**针对江都四站泵站单机组变角运行优化问题,提出了解决该问题的数学模型及求解方法。在优化算法的外部提前计算出了各时段满足功率约束的叶片角,降低了优化计算的复杂度。通过实验比较,得出了动态惩罚函数法能更有效地处理提水量约束条件。将动态惩罚函数遗传算法的计算结果和算法运行时间分别与动态规划法、枚举法进行对比,3种方法按照总费用从小到大排序依次是:枚举法、动态惩罚函数遗传算法、动态规划法,3种优化方法相互之间的单位提水费用偏差率均小于0.2%。运算时间方面,动态惩罚函数遗传算法和动态规划法几乎相同,枚举法耗时接近前2种方法的6倍。综合比较,动态惩罚函数遗传算法更适合江都四站泵站单机组变角运行优化问题的计算。

**关键词:**泵站单机组;约束条件;动态惩罚函数遗传算法;动态规划法;枚举法

中图分类号:TV675 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2019)06-0067-06

## A comparative study on the optimal operation of single adjustable – blade pump unit

SHENG Zhe

(China Mobile (Suzhou) Software Technology Co., Ltd., Suzhou 215153, Jiangsu)

**Abstract:** Aiming at the optimization problem of single – unit variable angle operation of Jiangdu NO. 4 pumping station, a mathematical model and solving method for solving this problem were proposed. The blade angle that satisfied the power constraint in each period was calculated in advance of the optimization algorithm, which reduced the complexity of the optimization calculation. Through experiment comparison, the dynamic penalty function method could be more effective in treatment of water extraction constraint. Comparing the result and operation time of dynamic penalty function GA with dynamic programming and enumeration method, from small to large sorting of three methods in accordance with total cost was enumeration method, dynamic penalty function GA, dynamic programming, the deviation rate of the unit water charge was all less than 0.2%. In the aspect of operation time, the dynamic penalty function GA and dynamic programming cost almost the same, and the enumeration methods' was 6 times as long as other two methods. Compared comprehensively, the dynamic penalty function GA was more suitable for solving the problem of optimal operation of single adjustable – blade pump unit in Jiangdu NO. 4 pumping station.

**Key words:** pump unit; constraint handling; dynamic penalty function GA; dynamic programming; enumeration method

收稿日期:2019-01-23

作者简介:盛喆(1990—),男,硕士研究生,研究方向为泵站调度、智能优化算法。

## 0 引言

2013 年 11 月 15 日~12 月 10 日,南水北调东线一期工程正式通水<sup>[1]</sup>。随着调水工作的逐步展开,调水成本问题引起了越来越多学者的关注<sup>[2-4]</sup>。因此,对泵站运行进行优化有着现实的经济意义。国内外学者对泵站运行优化问题早有研究,主要是通过构建不同层次的数学模型,采用动态规划、线性规划、试验优选、粒子群算法等对模型求解,从而实现泵站调水工作的优化调度<sup>[5-10]</sup>。泵站单机组是泵站系统中最基本的单元,对泵站单机组运行方式的研究是泵站系统优化调度研究的基础。本文以江都四站为例,建立了泵站单机组变角运行优化模型,采用基于动态惩罚函数的遗传算法对模型进行求解。最后,将计算结果与动态规划、枚举法计算结果进行对比。通过以上研究,希望能够对泵站运行优化提供参考。

## 1 模型的建立

对于 1 台泵站单机组,以日开机运行总耗电费最低为目标函数,日提水量和机组电动机额定功率为约束条件,各时段水泵叶片角为决策变量,建立泵站单机组变角运行优化数学模型。在考虑峰谷电价和水位变化的情况下将 1 d 划分为 SN 时段。为便于模型描述,定义如下变量,如表 1 所示。

模型的数学描述为:

目标函数:

$$f = \min \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho g Q_i(\theta_i) H_i}{\eta_{zi} \eta_{mot} \eta_{int}} \cdot \Delta T_i \cdot P_i \quad (1)$$

提水量约束:

$$\sum_{i=1}^{SN} Q_i(\theta_i) \Delta T_i \geq W_e \quad (2)$$

功率约束:

$$N_i(\theta_i) \leq N_0 \quad (3)$$

## 2 模型的求解

采用遗传算法对上述模型求解,求解过程分为约束条件处理和遗传算法求解两个步骤。

### 2.1 约束条件处理

一是功率约束。如式(3)所示,机组电动机实际运行功率应不大于机组电动机额定功率。不同于相关文献<sup>[11-13]</sup>中将功率约束带入优化计算的做法,本文在优化计算前考虑功率约束问题,这样可降低优化计算的复杂程度,提高算法的执行效率。

表 1 模型中变量的说明

变量	说明
$f$	目标函数,单机组日耗电总费用,元
$P$	分时电价, $P_i$ 指时段 $i$ 的电价,元/(kW·h)
$i$	时段编号, $i = 1, \dots, SN$
$W_e$	管理部门下达的日提水任务, $m^3$
$\rho$	水的密度, $\rho = 1000 \text{ kg}/m^3$
$\eta_{zi}$	装置效率, $\eta_{zi}$ 指时段 $i$ 机组的装置效率
$g$	地球的重力加速度, $g = 9.8 \text{ m}/s^2$
$\eta_{int}$	传动效率,直连机组的 $\eta_{int}$ 为 1
$Q$	机组流量,机组单位时间输送出的水的体积, $Q_i$ 指时段 $i$ 机组的流量, $m^3/s$
$\eta_{mot}$	电动机效率,在负荷大于 60% 时,认为 $\eta_{mot}$ 基本不变,为 94%
$\theta$	叶片角,水泵通过液压调节系统调整叶片角度, $\theta_i$ 指时段 $i$ 机组的叶片角,°
$N$	机组电动机功率, $N_i(\theta_i)$ 指单机组在时段 $i$ 叶片偏转角为 $\theta$ 时的实际功率, W
$H$	扬程,水泵能够扬水的高度, $H_i$ 指时段 $i$ 的扬程, m
$N_0$	机组电动机的额定功率, W
$\Delta T$	单个时段长度, $\Delta T_i$ 指时段 $i$ 的时长, h

由式(1)可知功率的计算公式为:

$$N_i(\theta_i) = \frac{\rho g Q_i(\theta_i) H_i}{\eta_{zi} \eta_{mot} \eta_{int}} \quad (4)$$

根据式(3)、式(4)和额定功率  $N_0$  可计算出各个时段满足功率约束的叶片角。

二是提水量约束。遗传算法中对约束条件的处理方法主要有 3 类:修复法、拒绝法和惩罚函数法<sup>[14]</sup>。修复法有着过强的问题依赖性以及可能产生比原问题求解更为复杂的修复过程,故不为本文所采用;拒绝法直接将不可行个体的适应度置为 0,处理起来简单高效;惩罚函数法最为常用,它能容忍种群中的个体在一定程度上违反给定的约束从而保持种群的多样性,再通过降低违反约束个体的适应度体现出违反约束的惩罚程度。常用的惩罚函数包括静态惩罚函数、动态惩罚函数和自适应惩罚函数<sup>[15]</sup>。本文选取了拒绝法、静态惩罚函数法、动态惩罚函数法和自适应惩罚函数法 4 种方法,通过比较这几种方法计算本模型的优化结果以及在

同一台计算机上的运行时间,从而获得处理提水量约束最优的方法。为减少单次计算误差的影响,在遗传算法迭代次数为 100,200,⋯,1000 的情况下,分别计算 4 种方法运行 100 次后所得结果的平均值。

### 2.2 遗传算法求解

适应度函数是遗传算法进行个体选择的关键,本模型是最小值问题,为方便计算个体的选择概率需转化为最大值问题。考虑到适应度非负的要求,需要确定一个较大的常数  $C_{max}$ ,用  $C_{max}$  减去目标函数。假设提水量约束的处理函数为  $P$ ,则适应度函数为:

$$F = C_{max} - \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho g Q_i(\theta_i) H_i}{\eta_{zi} \eta_{int} \eta_{mot}} \cdot \Delta T_i \cdot P_i + P \quad (5)$$

本文采用浮点数编码,算法具体描述如表 2。

## 3 江都四站泵站单机组变角优化运行

江都四站是江都排灌站第 4 号泵站,由 7 台同种型号的套立式轴流泵组成。机组叶片角调整范围为  $[-4^\circ, +4^\circ]$ ,机组电动机额定功率为 3550 kW,

根据峰谷电价和 水位变化将 1 d 划分为 9 个时段<sup>[16-17]</sup>。考虑日均扬程 7.8 m,日提水任务  $2.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,采用液压调节系统对叶片角进行调节。

### 3.1 江都四站泵站单机组变角运行优化模型求解

按照上述方法,将江都四站的数据带入式(3)、式(4)中计算可得各时段满足功率约束的叶片角,如表 3 所示。

表 3 各个时段满足功率约束的叶片角

时段	满足功率约束的叶片角(°)	时段	满足功率约束的叶片角(°)
I	-4, -2	VI	-4, -2, 0
II	-4, -2, 0	VII	-4, -2, 0
III	-4, -2, 0	VIII	-4, -2, 0
IV	-4, -2	IX	-4, -2
V	-4, -2		

在迭代次数为 100,200,⋯,1000 的情况下,分别计算拒绝法、静态惩罚函数法、动态惩罚函数法

表 2 采用浮点数编码的算法过程表

算法 1:基于动态惩罚函数遗传算法

定义:  $pop\_size$  //种群个体数目;  $run\_num$  //迭代次数;  $population[pop\_size]$  //种群数组

$fitvalue[pop\_size]$  //记录每个个体适应度的数组;  $maxfitvalue(\theta, totalcost)$  //最大适应度

输入:  $W_e$  //提水任务

输出:  $totalcost$  //总费用;  $\theta = \langle \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{SN} \rangle$  //各时段叶片角

```

1  GenerateInitialPopulation < pop_size > //生成初始种群
2  while i < run_numdo
    |
3      fitvalue ← CalculateFitnessValue < population > //计算适应度
4      population ← SelectionOperator < population > //轮盘赌算法进行选择操作
5      population ← CrossoverOperator < population > //单点交叉进行交叉操作
6      population ← MutationOperator < population > //基本位变异进行变异操作
7  end
8  for all j ∈ pop_size
9      | if maxfitvalue(θ, totalcost) < fitvalue[j] then //比较出最大适应度
10     | |   maxfitvalue(θ, totalcost) ← fitvalue[j]
11     | end
12 end
13 return θ and totalcost //返回 maxfitvalue(θ, totalcost) 对应的个体和该个体对应的费用
    
```

和自适应惩罚函数法运算本模型 100 次后结果的平均值,将结果用折线图表示,如图 1、图 2 所示。

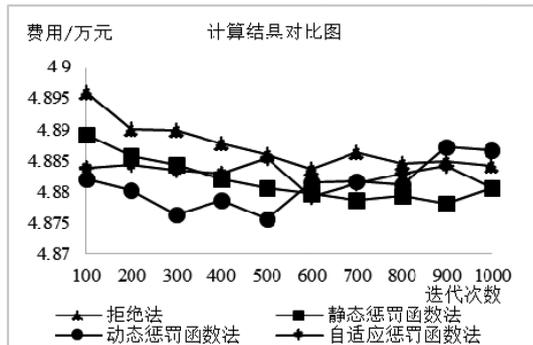


图 1 计算结果对比图

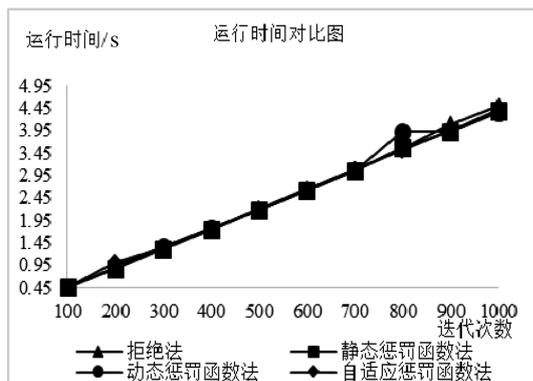


图 2 运行时间对比图

从图 1 中可以看出,4 种约束条件处理方法的计算结果总体趋势都是随着运行次数的增加,总费用先减少后增加。拒绝法由于“粗暴”的处理方法降低了种群的多样性,所以结果整体较差;静态惩罚函数法和自适应惩罚函数法各有优劣,迭代次数在 300 次以前自适应惩罚函数法的结果较好,300 次以后静态惩罚函数法的结果较好;在 100 ~ 500 迭代次数内,动态惩罚函数遗传算法的优化性能强于其它几种方法,在 500 迭代次数时取得了最小的总费用值。

从图 2 中可以看出,在 100 ~ 700 迭代次数内,4 种方法所耗费的时间几乎相同;在 800 迭代次数时,动态惩罚函数法耗时最多;在 800 ~ 1000 迭代次数内,拒绝法耗费时间较高,其它 3 种方法相差较小。从上述分析可知,动态惩罚函数法处理效果最好,算法合适的运行次数是 500 次,耗时约 2.18s。其中,动态惩罚函数具体设计如下<sup>[18]</sup>:

$$P = \begin{cases} 0, & g(\theta_i) \geq 0 \\ -(C^t)\alpha |g(\theta_i)|^\beta, & g(\theta_i) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$g(\theta_i) = \sum_{i=1}^{SN} Q_i(\theta_i) \Delta T_i - W_e \quad (7)$$

式中:  $P$  为动态惩罚函数,  $C$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为调节惩罚大小的常参数,  $t$  为迭代次数,  $g(\theta_i)$  表示当前提水量与管理部门下达的提水任务的差值。

该惩罚函数通过  $C$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  来调节惩罚程度的大小,随着迭代次数的增加,即  $t$  增大,惩罚项也增大,对不可行解的惩罚加大。随着迭代进程的深入,不可行解抛弃的进程加快,使得算法有较快的收敛速度<sup>[19]</sup>。

将式(6)代入式(5)中得到适应度函数,采用算法 1 对江都四站泵站单机组变角运行优化模型求解,求解结果见 3.2 章节。

### 3.2 计算结果及对比分析

泵站单机组变角运行优化模型是典型的带约束条件的单目标最优化数学模型,动态规划和枚举法对该模型均有较好的求解能力。按照 3.1 章节所述方法对江都四站泵站单机组变角运行优化模型求解,同时采用动态规划<sup>[20-21]</sup>、枚举法<sup>[22]</sup>进行相应求解,3 种方法的计算结果如表 4 所示。

通过对表 4 中数据进行分析可知:

(1)3 种方法计算的提水量在时段 I、II、VI、VII 均较小,在其它时段的提水量相对较大,这 4 个时段是分时扬程和分时电价相对较高的时段。高扬程高电价时段少提水,低扬程低电价的时段多提水,这样可降低总费用。

(2)3 种方法求得的提水量均大于  $2.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,满足提水量约束。按照总费用从小到大排序,依次是枚举法、动态惩罚函数遗传算法、动态规划法。通过计算 3 种方法的单位提水费用(如表 5 所示),可知 3 个解相差不大,单位提水费用相互之间的偏差率均小于 0.2%。

(3)3 种方法在计算时间上存在差异性。采用 C#编程,在 Intel Core i3 2.13GHz,2GB 内存的计算机上运行,3 种方法的运算时间如表 5 所示。动态惩罚函数遗传算法和动态规划法运算时间相近,枚举法耗时接近其它 2 种方法的 6 倍。

根据上述比较分析,总提水费用方面,枚举法费用最少,动态惩罚函数遗传算法次之,动态规划法最多;单位提水费用方面,3 种方法求解结果均较好;运算时间方面,动态惩罚函数遗传算法和动态规划法计算时间几乎相同,枚举法耗时较多。综合考虑,动态惩罚函数遗传算法更适合求解江都四站泵站单机组变角优化运行问题。另外,遗传算法有着强大的问题适用性和求解能力,在后续对多机组、泵站群、梯级泵站的研究中仍能有很好的应用。

表4 江都四站泵站3种方法计算结果

时段	分时电价 (元/kW·h)	扬程(m)	动态惩罚函数遗传算法			动态规划法			枚举法		
			叶片角 (°)	水量(m <sup>3</sup> )	费用(元)	叶片角 (°)	水量(m <sup>3</sup> )	费用(元)	叶片角 (°)	水量(m <sup>3</sup> )	费用(元)
I	0.978	8.06	-3	212320.08	6402.72	-3	212320.08	6402.72	-1	228738.96	6791.98
II	0.978	7.46	-2	235655.28	6338.76	-4	217110.96	6000.36	-3	226669.68	6092.41
III	0.587	7.4	-2	236941.92	3786.85	1	263292.48	4154.15	-4	218358.00	3583.62
IV	0.276	7.82	-1	470520.00	3757.46	-1	470520.00	3757.46	-1	470520.00	3757.46
V	0.276	8.13	-1	453306.24	3857.13	-1	453306.24	3857.13	-1	453306.24	3857.13
VI	0.978	7.5	-4	216267.84	6019.34	-4	216267.84	6019.35	-3	225812.88	6112.81
VII	0.978	7.36	-1	245895.12	6428.96	-2	237784.32	6289.47	-3	228764.16	6041.69
VIII	0.587	7.69	-1	357710.04	5932.73	-2	345649.68	5810.11	0	372683.16	6233.26
IX	0.587	8.09	-3	317242.44	5777.89	-1	341785.44	6130.71	-3	317242.44	5777.89
合计				2745858.96	48301.85		2758037.04	48421.46		2742095.52	48248.25

表5 单位提水费用和算法运行时间

算法	动态惩罚函数遗传算法	动态规划法	枚举法
单位提水费用(元/m <sup>3</sup> )	0.017591	0.017556	0.017594
算法运行时间(s)	2.25	2.18	12.83

### 4 结论

本文提出了泵站单机组变角运行优化模型,采用遗传算法对模型进行求解。以江都四站为例,在日均扬程7.8 m,日提水任务 $2.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ 情况下,将拒绝法、静态惩罚函数法、动态惩罚函数法、自适应惩罚函数法在不同迭代次数下分别运行100次的平均费用进行比较,得出了动态惩罚函数法适合处理提水量约束的结论;将动态惩罚函数遗传算法的求解结果与动态规划、枚举法相比,证明动态惩罚函数遗传算法更适合求解该问题。

现阶段,本文的研究处于单机组的层面,需进一步进行多机组、泵站群、梯级泵站的研究。另外,本文及后续泵站系统的研究可通过开发相应的专家系统、管理系统落实到应用层面。

#### 参考文献:

[1] 郭鹏,任静.南水北调东线一期工程沿线历年水质变化分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(1):

59-64.

[2] 方国华,耿建强.水库优化调度扰动遗传算法研究[J].水电能源科学,2009,27(6):38-40.

[3] 邵琳,王丽萍,黄海涛,等.水电站水库调度图的优化方法与应用:基于混合模拟退火遗传算法[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):40-43.

[4] 魏加华,张远东.基于多目标遗传算法的巨型水库群发电优化调度[J].地学前缘,2010,17(6):255-262.

[5] Edson da Costa Bortoni, Roberto Alves de Almeida, Augusto Nelson Carvalho Viana. Optimization of parallel variable - speed - driven centrifugal pumps operation [J]. Energy Efficiency, 2008(1):167-173.

[6] Jozsef Gergely Bene, Istvan Selek, Csaba Hos. Natural Search Technique for Short - Term Pump Schedule Optimization [J]. Water Resour. Plann. Manage, 2010, 136(1):133-137.

[7] Paul W. Jowitt, George Germanopoulos. Optimal pump scheduling in water - supply networks [J]. Water Resour. Plann. Manage, 1992, 118(4):406-422.

- [8] 江磊, 专祥涛. 泵站多机组变频变速调节运行优化研究[J]. 人民长江, 2018, (18):97-102.
- [9] 梁兴. 基于粒子群算法的梯级泵站优化调度研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(3):139-141.
- [10] 袁尧, 刘超, 等. 基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3):38-44.
- [11] 冯晓莉, 仇宝云, 黄海田, 等. 南水北调东线江都排灌站优化运行研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4):130-134.
- [12] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站叶片可调单机组日运行优化方法研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4):499-504.
- [13] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组变速运行优化方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3):72-76.
- [14] 余文, 李人厚. 遗传算法对约束优化问题的研究综述[J]. 计算机科学, 2002, 29(6):98-101.
- [15] 徐健锐, 朱会娟. 基于自适应惩罚函数的云 workflow 调度协同进化遗传算法[J]. 计算机科学, 2018, (8):105-112.
- [16] 张礼华, 程吉林, 张仁田, 等. 江都四站站内多机组变角优化运行方式研究[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2010, 13(2):75-78.
- [17] 张德胜, 施卫东, 关醒凡. 南水北调东线江都四站装置模型的试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1):170-174.
- [18] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 基于遗传算法的电动汽车换电站经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2101-2107.
- [19] 陈浩, 李军, 唐宇, 等. 基于动态惩罚函数遗传算法的电磁探测卫星多星规划方法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2):44-50.
- [20] 张爱华, 郭喜跃, 陈前军. 动态规划算法分析与研究[J]. 软件导刊, 2014, 13(12):68-69.
- [21] 赵钢铁, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 水库调度决策单调性与动态规划算法改进[J]. 水利学报, 2012, 43(4):414-421.
- [22] 姚田森, 魏建刚. 枚举法在船岸起重机钢丝绳铰点托辊上的应用[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(3):231-261.