

DOI: 10.14188/j.1671-8844.2015-02-003

文章编号: 1671-8844(2015)02-0156-04

基于 Pareto 最优解的梯级泵站双目标优化调度

梁兴^{1,2}, 刘梅清¹, 燕浩¹, 吴远为¹, 林鹏¹

(1. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 2. 南昌工程学院机械与电气工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 针对大型梯级泵站运行特点, 用调度周期内的机组启动次数衡量维修成本, 建立以抽水电费最小和机组启动次数最少为优化目标, 以调度周期内流量分配为决策变量的双目标优化调度模型, 并基于 Pareto 最优解理论, 开展混合粒子群求解算法研究, 并将双目标优化调度模型应用于工程实际. 研究表明, 双目标优化调度能够反映抽水电费与机组维修费用之间的内在联系, 即抽水电费最优解随着机组启动次数的增加, 呈现出先减少后增大的趋势, 但在某一范围内, 随着机组启动次数的增加, 抽水电费最优解变化幅度较小, 系统最优调度方案在此区间内选择不仅能够有效地降低抽水电费, 也能够避免维修成本的急剧增加, 这为梯级泵站调度决策提供了有力的理论依据.

关键词: 双目标优化调度; 梯级泵站; Pareto 最优解; 粒子群算法

中图分类号: TV 675

文献标志码: A

The double objectives optimal scheduling of multistage pumping stations based on Pareto-optimal method

LIANG Xing^{1,2}, LIU Meiqing¹, YAN Hao¹, WU Yuanwei¹, LIN Peng¹

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: The mathematical model is established to optimize the scheduling of multistage pumping stations, which use the minimum pumping costs and the minimum start-up times of units as the optimal objectives. And then the particles swarm optimization combined with the Pareto-optimal method is used to solve the optimal scheduling model. The research results show that this optimal model can reveal the internal relationship between pumping costs and maintenance costs easily; with the start-up times of units increase, the optimal pumping costs decrease first and then increase; but in a certain range, the change of optimal pumping costs is smaller with the start-up times of units increase; so the optimal scheduling is best to choose in this range; and this research is not only helpful to decrease the pumping costs, but also to avoid the maintenance costs increase.

Key words: double objectives optimal scheduling; multistage pumping stations; Pareto optimal method; particles swarm optimization

大型梯级泵站是缓解水资源分布不均匀和解决城市缺水的重要水利设施, 在国民生活和经济发展中发挥着重要作用. 此类工程一般具有管线长、流量大、运行时间长、能耗大等特点, 其优化调度向来是科研人员和工程运行人员的关注热点之一. 但是, 目

前关于大型梯级调水工程优化调度研究, 往往只侧重于工程运行成本, 而忽略机组维修成本等其他涉及到工程运行经济性的指标^[1-4]. 比如, 杨建军^[5]等以多水源注水系统泵站运行行为为研究对象, 采用双重编码技术建立了优化调度模型, 并探讨了优化调度

收稿日期: 2014-12-05

作者简介: 梁兴(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事流体机械及工程方面的研究, E-mail: liangxny@163.com.

通讯作者: 刘梅清(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程方面的研究, E-mail: liumq@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 50879062); 湖北省水利重点科研课题(编号: HBSLKJ201307).

模型求解方法.文献[6]针对万家寨引黄工程特点,推导了大型梯级泵站优化调度模型;文献[7]综合考虑供水需求和当地电价等因素,采用克隆算法获得梯级泵站最优调度方案.大量研究表明^[1-7],以抽水电费最小为优化目标的泵站运行最优方案,往往会造成较高的机组启动次数,而泵站机组启动频率与机组维修成本存在着较强的联系,部分研究甚至认为机组维修费用与机组启动次数呈线性关系^[8],机组频繁启动不仅会增加机组零部件的损失,缩短机组使用寿命,同时也会提供机组故障几率,导致机组维修、维护成本增加.

因此,以抽水电费最小为目标的优化调度最优方案在实际应用中虽然能减少抽水成本,但却增加了机组维修成本,其运行经济性值得商榷.但是,机组维修费用涉及内容较多,不易直接计算.为此,本文用调度周期内机组启动次数衡量机组维修成本的大小,进而建立以抽水电费最小和机组启动次数最少为优化目标,以调度周期内流量分配为决策变量的双目标优化调度模型,并利用基于 Pareto 最优解理论的混合粒子群算法进行求解,分析运行成本与维修成本之间的内在联系,为梯级调水工程优化调度并提高工程运行经济性提供科学依据.

1 梯级泵站双目标优化调度模型

1.1 梯级泵站优化调度目标函数

若以调度周期内不同时刻下的流量分配情况为决策变量,则优化调度模型目标函数如下:

1) 调度周期内抽水电费计算函数:

$$\min(p) = \min\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{\gamma H_{st}(i,j) q(i,j) T(i,j) D(i,j)}{\eta(i,j)}\right) \quad (1)$$

式中: p 为调度周期内梯级泵站耗电电费; $H_{st}(i,j)$ 为第*i*个泵站第*j*个时段下的泵站静扬程; $D(i,j)$ 为第*i*个泵站第*j*个时段下的当地电价; γ 为水的重度; $q(i,j)$ 为第*i*个泵站在第*j*个时段下的站流量,且假定相同时段下该站所有运行的机组流量相同; $T(i,j)$ 为第*i*个泵站第*j*个时段下的运行时长; $\eta(i,j)$ 为第*i*个泵站第*j*个时段的水泵装置效率.

2) 调度周期内机组启动次数计算函数:

$$\min(E) = \min\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J L(i,j)\right) \quad (2)$$

式中: E 为调度周期内调水工程各级泵站加减速次数之和; $L(i,j)$ 为第*i*个泵站第*j*个时段与前一时刻相比,泵站机组加减速台数.

1.2 系统约束条件

1) 首站提水量约束:

$$S(1) = \sum_{j=1}^J q(1,j) \quad (3)$$

式中: $S(1)$ 为调度周期内首站计划提水量.

2) 工程沿线流量平衡约束:

$$q(i-1,j) = q(i,j+st(i)) + q'(i,j) \quad (4)$$

式中: $st(i)$ 为相邻两站流量滞后时差; $q'(i,j)$ 为相邻两站时均区间分水量.

1.3 站内约束条件

1) 进、出水池水位约束:

$$\begin{cases} z_{\min}(i) \leq z(i) \leq z_{\max}(i) \\ z'_{\min}(i) \leq z'(i) \leq z'_{\max}(i) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $z_{\min}(i)$ 、 $z_{\max}(i)$ 、 $z'_{\min}(i)$ 、 $z'_{\max}(i)$ 分别代表第*i*个泵站进、出水池最低和最高水位.

2) 泵站流量约束:

$$q_{\min}(i) \leq q(i,j) \leq q_{\max}(i) \quad (6)$$

式中: $q_{\min}(i)$ 和 $q_{\max}(i)$ 代表第*i*个泵站的最小和最大允许站流量.

另外,针对具体泵站运行规程和水泵参数,还需要考虑其他一些约束条件,比如水泵为叶片可调式泵,则水泵在运行中需要对叶片角度等加以约束;从机组启动安全角度考虑,泵站也可能对机组连续启动间隔时间加以约束.

2 双目标优化调度模型求解算法

2.1 Pareto 最优解基本理论

当泵站运行寻求抽水电费较小时,机组启动次数则较多,当泵站采用恒定流量提水时,机组启动次数为0,但是抽水电费则较高.显然,抽水电费最小与机组启动次数最小之间存在着一定的矛盾,动态规划法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等常规算法并不能直接求解双目标优化调度问题^[9,10].为解决双目标之间的矛盾问题,本文特引入 Pareto 最优解概念,即假定 x 是决策变量, $f(x)$ 是关于 x 的优化目标, $g(x)$ 代表双目标优化调度模型中的不等式约束, $h(x)$ 代表双目标优化调度模型中的等式约束, $x_i^{(L)}$ 和 $x_i^{(U)}$ 代表决策变量的取值范围.则 Pareto 最优解的基本概念如下:

1) Pareto 支配解

当 $\forall x_1 \in X$ 和 $\forall x_2 \in X$,且 $x_1 \neq x_2$,则满足以下两个条件,则可以称决策向量 x_1 支配决策向量 x_2 .

① $f_1(x_1), f_2(x_1), \dots, f_m(x_1)$ 等所有的关于 x_1 的优化结果都不比所有关于 x_2 的优化结果差;

② 在 $f_1(x_1), f_2(x_1), \dots, f_m(x_1)$ 等优化结果中

至少有一个要优于 $f_1(x_2), f_2(x_2), \dots, f_m(x_2)$.

2) Pareto 非支配解

当 $x_1 \in X$, 如果解空间 X 中其他任意一个解都不支配 x_1 , 则称 x_1 为多目标优化问题的非支配解, 即 Pareto 非支配解.

因此, 双目标优化问题并不存在唯一的全局最优解, 而是存在若干个局部最优解, 而局部最优解的集合, 即 Pareto 最优解. 进而梯级泵站双目标优化调度求解则可以转化成寻找关于抽水电费最小和机组启动次数最少等非支配解.

2.2 基于 Pareto 解的混合粒子群算法

本文采用粒子群算法求解双目标优化调度模型. 在粒子群算法(PSO)中, 如果解是 J 维的, 那每个 J 维的粒子都可被视为优化问题的一个潜在解, 它由适应度函数评估其当前位置的优劣, 而粒子群则是解空间上的一个子集, 它通过粒子的“飞行”来完成对解空间的搜索, 以确定最优解.

在梯级泵站双目标优化调度中, 随机产生的梯级泵站流量分配方案 $q(i, j)$ 可视为一个初始粒子, 粒子群则有 K 个不同的 $q(i, j)$ 组成, 记为 $Q(i, j)$. 则第 k 个粒子 $q(i, j)_k^t$ 经过第 $t+1$ 次飞行后, 到达的新位置 $q(i, j)_{t+1,k}$, 可通过下式计算得出:

$$v_k^{t+1} = \omega v_k^t + C_1 R_1^t (p_{\text{best}_k} - q(i, j)_k^t) + C_2 R_2^t (g_{\text{best}} - q(i, j)_k^t) \quad (7)$$

$$q(i, j)_{t+1,k} = q(i, j)_k^t + v_k^{t+1} \quad (8)$$

式中: v_k^t 为第 k 个粒子第 t 次的飞行速度; p_{best_k} 为第 k 个粒子本身经历的最佳位置; g_{best} 为整个粒子群所经历的最佳位置. 由于双目标优化结果不唯一, 则 p_{best_k} 和 g_{best} 也不是唯一的. 相对于单目标粒子群算法而言, 双目标粒子群算法 p_{best_k} 和 g_{best} 都是由若干非支配解组成的集合中随机抽取的一个(前者属于第 k 个粒子在飞行中获得的非支配解 p_{best_k} , 后者代表粒子群的非支配解集合 g_{best}). 其中, g_{best} 则是包含了所有粒子在迭代过程中所发现的所有非支配解, 即 Pareto 最优解. ω 为粒子飞行的惯性因子, C_1 和 C_2 为粒子的学习因子, R_1^t 和 R_2^t 是在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机变量.

在整个算法中, 为了编程方便, 不论是粒子个体的 Pareto 最优解集 p_{best_k} , 还是粒子群的 Pareto 最优解 g_{best} , 所包含的解个数均为预先设定的有限值. 而非支配解数量则并不确定, 因此可能存在求解过程中所获得非支配解个数大于算法设定 Pareto 最优解个数的现象, 在此特引入拥挤距离来解决非支配解之间的更替问题^[11].

$$\begin{cases} d_q(x_k) = \frac{|f_q(x_k) - f_q(x_j)|}{\max(f_q) - \min(f_q)} \\ D(x_k) = \sum_{q=1}^m d_q(x_k) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f_q(x_k), f_q(x_j)$ 为对第 q 个目标函数最近的非支配解; $\max(f_q), \min(f_q)$ 分别为所有 Pareto 最优解在第 q 个目标函数上的最大值和最小值. 利用式(9)对所有的非支配解计算相邻非支配解所形成的平均边长, 而 x_k 的拥挤距离就是对所有优化目标函数的平均边长和. 一般认为, Pareto 最优解在某些区域分布较密集的地方是连续且光滑的, 这些区域内的非支配解拥挤距离较小, 可以将拥挤距离较小的非支配解排除掉, 一方面尽可能扩大了 Pareto 最优解的范围, 另一方面也能保持解集合的精度.

3 实例分析

3.1 工程简介

广东某梯级泵站由 4 级泵站组成, 全长约 68 km, 首站设计流量为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计年总供水量为 24.23 亿 m^3 . 由于该工程输水管渠组成复杂、输水线路长, 当首站流量改变后, 依次各级泵站存在着明显的流量变化滞后现象, 为满足优化调度方案实时性要求, 采用特征线法模拟供水系统依次减少机组时的水力瞬变过程, 并与工程调度经验相结合, 确定相邻泵站之间的流量滞后时间差依次为 30、60 和 90 min. 针对该梯级泵站 2009 年 11 月 12 日运行实测数据进行优化调度仿真, 当天首站抽水量为 650 万 m^3 , 沿线实际分水量见表 1, 当时电价如图 1 所示.

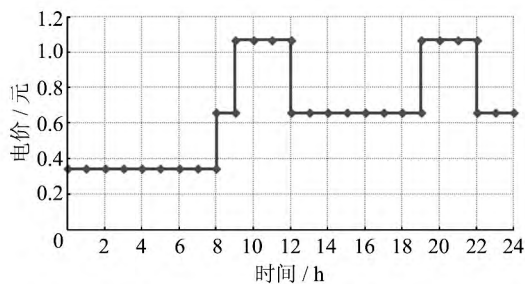


图 1 当地电价示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the local price

表 1 2009 年 6 月 18 日沿线分水量表

Table 1 Water diversion in June 18, 2009

	区间分水量/万 m^3		
	首站至 2 级站	2 级站至 3 级站	3 级站至 4 级站
实际分水量	1.938 5	33.218 7	38.222 0

3.2 优化结果分析

对以抽水电费和机组启动次数等目标的梯级调水工程双目标优化调度问题,将其应用于上述梯级泵站,并利用基于 Pareto 解的混合粒子群算法进行求解,优化结果如图 2 所示。

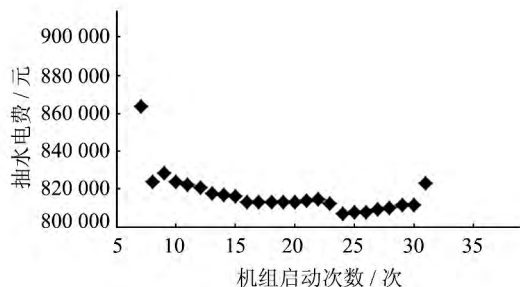


图 2 日抽水量 650 万 m^3 时 Pareto 最优解对比图
Fig. 2 Pareto optimal solution comparison chart when daily pumping 6.5 million m^3

图 2 表明,随着启动次数的增加,抽水电费呈非线性变化:大致呈现先减小后增加的趋势,同时由于调度方案一方面要满足日抽水量规划要求,另一方面梯级泵站各泵站水泵参数不同,且存在分水量等问题,可能导致某些流量分配方案不符合水泵运行

条件,因此, Pareto 最优解的分布并非呈连续分布。在 Pareto 最优解中,机组启动次数较小时所对应的最优调度方案其经济效益最差,当机组启动次数为 7 次时,抽水电费高达 86.30 万元;启动次数在 24 次时,系统抽水电费最低,为 80.77 万元,比启动次数 7 次时节省了 5.53 万元。启动次数在 16—30 次之间,抽水电费变化较小,最大相差仅 0.69 万元,尤其是启动次数在 16—22 次之间,抽水电费几乎不变。由于研究对象已运行多年,偏重于考虑机组维修成本,则宜选择启动次数为 16 次所对应的 Pareto 最优解,具体调度方案如图 3 和表 2 所示。

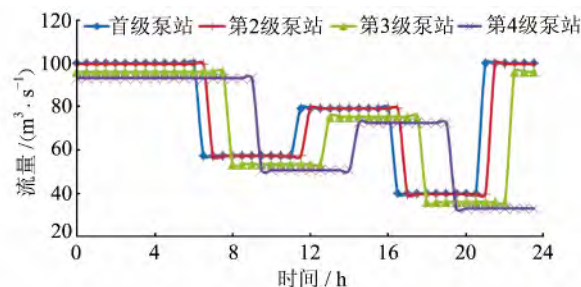


图 3 最优方案下梯级泵站站流量变化图
Fig. 3 Multistage pumping stations flow under optimal solution

表 2 梯级泵站最优方案简表

Table 2 Optimal solution summary table of multistage pumping stations

m^3/s

太园泵站			莲湖泵站			旗岭泵站			金湖泵站		
时间	站流量	开机台数	时间	站流量	开机台数	时间	站流量	开机台数	时间	站流量	开机台数
0:00-6:30	100	5	0:00-7:00	99.72	6	0:00-8:00	96.07	6	0:00-9:30	93.18	6
6:30-11:00	56.20	3	7:00-11:30	55.93	4	8:00-12:30	52.28	4	9:30-14:00	49.39	4
11:00-16:00	79.14	4	11:30-16:30	78.86	5	12:30-17:30	75.21	5	14:00-19:00	72.52	5
16:00-20:30	39.88	2	16:30-21:00	39.6	3	17:30-22:00	35.95	3	19:00-23:30	33.06	3
20:30-0:00	100	5	21:00-0:00	99.72	6	22:00-0:00	96.07	6	23:30-10:30	93.18	6

从表 2、图 2 和图 3 中看出,在此方案中,首站每天在 6 点 30 分由 5 台机组减至 3 台机组运行,在 11 点则由 3 台机组增值 4 台机组运行,在 16 点则减为 2 台机组,20 点 30 分又重新增加至 5 台机组运行,其后的三级泵站则根据流量滞后关系依次进行增减机组。采用该最优调度方案时,梯级泵站一天抽水电费为 81.13 万元,虽然比 Pareto 最优解中的最小抽水电费多了 0.36 万元,但机组启动次数则降低了 50%,有效地减少了机组故障几率,降低了机组维修成本,提高了梯级泵站运行安全性和经济性。

4 结论

本文在粒子群算法的基础上引入 Pareto 最优解理论,有效地解决了梯级泵站多优化目标之间相互冲突的问题,并揭示了两者之间的内在联系,主要

结论如下:

1) 随着机组启动次数的增加,相应的抽水电费最小值呈先减少后增加的趋势。片面地寻求抽水电费最小化,将在一定程度上导致机组启动次数的增加,导致机组维修费用的增加,工程经济性并不能得到保证。

2) 随着机组启动次数的增加,在某一范围内,相应的抽水电费值变化并不明显,工程实际调度方案宜在此范围内选择。工程实例研究表明,机组启动次数在 16—30 次之间时,对应的抽水电费最大差值仅为 0.69 万元,若机组相对老化,故障发生几率较高,则建议采用机组启动次数较少的方案,反之,则可以采用机组启动次数较多的方案。

(下转第 165 页)

- 2130.
- [6] Yang Zhengjian, Liu Defu, Ji Daobin, et al. An eco-environmental friendly operation: An effective method to mitigate the harmful blooms in the tributary bays of Three Gorges Reservoir[J]. Science China Technological Sciences, 2013,56(6): 1458-1470.
- [7] 纪道斌,刘德富,杨正健,等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报, 2010,41(6): 691-696.
- [8] Yang Zhengjian, Liu Defu, Ji Daobin, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. Sci. China Tech Sci., 2010,53(4): 1114-1125.
- [9] 乔晔,廖鸿志,蔡玉鹏,等. 大型水库生态调度实践及展望[J]. 人民长江, 2014,45(15): 22-26.
- [10] 张洪波,黄强,钱会. 水库生态调度的内涵与模型构建[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011,44(4): 427-433.
- [11] 尹正杰,黄薇,陈进. 长江流域大型水库实施生态调度方法框架研究[J]. 人民长江, 2011,42(4): 60-63.
- [12] 周建军. 关于三峡电厂日调节调度改善库区支流水质的探讨[J]. 科技导报, 2006,23(10): 8-12.
- [13] 廖文根. 水动力调控: 抑制三峡库区支流水华的路径[J]. 中国三峡建设, 2008,(5): 60-63.
- [14] 许可,周建中,顾然,等. 基于日调节过程的三峡水库生态调度研究[J]. 人民长江, 2010,41(10): 56-58.
- [15] 中华人民共和国水利部. 三峡水库调度和库区水资源与河道管理办法, 2008. [EB/OL]. [2014-03-22]. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/zcfg/bmfggfwj/200811/t20081120_156106.html.
- [16] 辛小康,尹伟,叶闽. 水动力调控三峡库区支流水华方案初步研究[J]. 水电能源科学, 2011,29(7): 16-18.
- [17] 马超,练继建. 人控调度方案对库区支流水动力和水质的影响机制初探[J]. 天津大学学报, 2011,44(3): 202-209.
- [18] 练继建,姚烨,马超. 香溪河春季突发水华事件的应急调度策略[J]. 天津大学学报, 2013,46(4): 291-297.
- [19] 叶守泽,詹道江. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [20] 长江水利委员会. 三峡-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程[S], 2007.

(上接第 159 页)

参考文献:

- [1] 朱劲木,李强,龙新平,赵文. 梯级泵站优化运行的遗传算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008,41(1): 108-111.
- [2] 桑国庆. 基于动态平衡的梯级泵站输水系统优化运行及控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [3] Vieira F, Ramos H M, Covas D I C, Almeida A B. Pump-storage optimization with renewable energy production in water supply systems[C]//BHR Group - 4th International Conference on Water and Wastewater Pumping Stations, 2008;99-112.
- [4] Ostfeld, Avi. Chemical water stability in optimal operation of water distribution systems with blended desalinated water[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(6): 531-541.
- [5] 杨建军,刘扬,魏立新,等. 多源注水系统泵站优化调度的双重编码混合遗传算法[J]. 自动化学报, 2006,32(1): 154-160.
- [6] 段富. 大型梯级引水工程自主优化调度模型及其仿真的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [7] Fu Duan, Li Xiaoqin, Peng Jietong. Hierarchical clonal selection algorithm for multistage pumping station optimization operation problem[C]//Proceedings-2009 2nd International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, WKKD 2009, 2009: 689-692.
- [8] Sousa C M, Covas D I C, Ramos H M. Multi-objective optimization of pumping system operation using heuristic techniques[C]//BHR Group-4th International Conference on Water and Wastewater Pumping Stations, 2008;153-162.
- [9] 郭希旺,刘士新,王立志. 多目标拆卸序列优化问题的分散搜索算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 56-59.
- [10] 陈亮,陈雨果. 多目标发电调度策略与方法[J]. 电力系统自动化, 2012,36(9): 103-108.
- [11] 彭星光,徐德民,高晓光. 基于 Pareto 解集关联与预测的动态多目标进化算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 615-618.