

基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略*

袁尧 刘超

(扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 针对泵站优化运行计算时最优解评价指标单一的问题,建立了包含机组开停机约束的泵站优化运行数学模型和运行方案选优的投影寻踪决策模型。提出了求解泵站多机组优化运行模型的蚁群算法,并通过分析模型的特性改进了算法中启发式信息和信息素更新方式。对江都四站多机组日优化运行计算的结果显示,变量同等离散的情况下,利用蚁群算法优化的结果比用动态规划逐次逼近法优化的结果节省了2.8%的电费,前者相比设计工况运行时节省了29.2%的电费,且蚁群算法优化结果对应的运行方案中叶片调节次数少,机组运行时间短;方案选优时投影寻踪决策模型能够兼顾多个评价指标的优选,得到的运行方案不仅运行成本低,且更合理,更贴切于日常运行,可见改进后的蚁群算法结合投影寻踪决策模型在泵站优化运行及相近的领域有较大的实用价值。

关键词: 泵站 优化运行 蚁群算法 投影寻踪

中图分类号: TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0038-07

Pump Operation Optimization and Projection Pursuit Evaluation Strategy Based on Ant Colony Optimization

Yuan Yao Liu Chao

(School of Water Conservancy Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Usually the evaluation index of optimal pump operation solution is single. An optimal pump operation model which contained the constraint of start-stop pump unit was developed, and projection pursuit evaluation method for scheme optimization was proposed. The ant colony optimization algorithm was used to calculate the model. The heuristic information and the pheromone trail update method were improved by analyzing characters of the model for better performances. A calculation example for the No. 4 Jiangdu pumping station was conducted. The results from ant colony optimization algorithm showed that 29.2% of energy fee could be saved under the designed operation condition, which was compared with the result from dynamic programming with successive approximation algorithm under the same discrete condition, and was better with 2.8% of the result from dynamic programming. The results from ant colony optimization algorithm had less times of the blade adjusting, and shorter operating time of the pumps. Projection pursuit evaluation could give consideration to multiple evaluation indexes. The evaluation result of projection pursuit not only has low electric fee, but also suitable for practical operation, which indicates that ant colony optimization algorithm combined with projection pursuit evaluation method can provide a high application value to the field of optimal operation of pumping stations and related fields.

Key words: Pumping station Pump operation optimization Ant colony algorithm Projection pursuit

收稿日期: 2012-09-27 修回日期: 2012-10-24

* 国家自然科学基金资助项目(51279173)、2010年江苏省水利动力工程重点实验室开放课题资助项目(K100019)和2010年度扬州大学研究生培养创新工程资助项目(扬大研[2010]9号)

作者简介: 袁尧, 博士生, 主要从事跨流域调水理论与关键技术研究, E-mail: yaoyzdx@126.com

通讯作者: 刘超, 教授, 博士生导师, 主要从事跨流域调水理论与关键技术研究, E-mail: liuchao@yzu.edu.cn

引言

大型泵站是跨流域调水工程运转的关键环节,运行时消耗相当多的能量,且大多数泵站都是以一种固定的方式运行,很少根据运行条件的变化调节工况,导致泵机组经常偏离设计工况运行,运行效率低,能源浪费大。因此,研究泵站优化运行的意义重大^[1]。近年来,泵站优化运行的研究取得了不少进展^[2-3],但仍然存在一些不足,主要体现在以下两个方面:①已有的研究大多仅考虑以运行电费最小为优化目标,求得的优化运行方案并不十分贴切实际,许多方案同日内泵机组开停机次数多,叶片角调节次数也多,不仅给实际运行时的操作带来了不便,同时也会增加装置维护成本,降低装置运行寿命。②泵站优化运行是复杂的组合优化问题,表述容易,求解困难,已有的求解方法包括确定性算法(如等微增率法^[4]、动态规划法^[5]等)和近似性算法(如遗传算法^[6]、混沌算法^[7]以及其他一些智能优化算法^[8-10])。确定性算法虽然可以找到问题的最优解,但问题规模较大时,求解效率比较低;近似算法在泵站优化运行问题中已有的研究仅限于能够应用,着重于优化运行方案与原设计运行方案的比较,对算法中关键信息如何针对问题本身的特性进行改进,以避免算法因陷入局部最优而遗漏全局最优,以及进一步提高算法求解效率等方面的研究较少。

针对上述问题,本文综合分析影响泵站优化运行的因素,建立多机组泵站优化运行的数学模型,提出利用改进的蚁群算法求解模型,使其应用于泵站优化运行问题计算时有更好的收敛性;利用投影寻踪的方法评价多个影响泵站优化运行的因素,最终通过选优决策获取更合理、更适宜的优化运行方案。

1 基本理论

1.1 泵站优化运行数学模型

泵站优化运行通常采用的准则有^[4]:①提水系统效益最大准则。②提水系统运行成本最小准则。③泵站提水量最大准则。④泵站耗能最小准则。⑤机组装置效率最高准则。目前最常用的为提水系统运行成本最小准则,即在满足约束条件的前提下,使得泵站的运行费用最少。泵站的运行费用主要包括机组运行电费和装置维护费,其中装置维护费很难准确地计算,因此数学模型的目标函数中一般只包含运行电费。但是装置维护费也不能完全忽略,研究发现装置的启动和调节对装置维护周期的影响很大,Nilsson曾调查过瑞典电力公司估算的水电机组启动的成本^[11],据估算,机组每起停一次,约降低

运行寿命10~15 h。每年启动超过150次的机组,运行寿命甚至会降低20%,所以泵站优化运行方案中实现运行电费最小的同时有必要对泵机组的起停加以约束。

以配备叶片可调装置的泵站多机组日运行为例,假定泵转速不变,在日抽水总量给定的前提下,考虑峰谷电价和水位的涨落将一天划分为 T 个时段,分配抽水总量至各个时段,选取各时段的泵运行台数,通过叶片调节泵运行工况,使得泵站一天运行的总电费最少,据此建立数学模型。

目标函数

$$f = \min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^T \frac{\rho g Q_{ij}(\beta(k)) H_{zi}}{\eta_{zij}(\beta(k)) \eta_{\text{mot}} \eta_c} \Delta T_i P_i$$

总水量约束

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^T Q_{ij}(\beta(k)) \Delta T_i \geq W_e$$

单机流量约束

$$Q_{j,\min} \leq Q_j \leq Q_{j,\max}$$

开停机次数约束:单台机组一天内开停机一次
 式中 f ——运行总电费 J ——机组台数
 T ——按峰谷电价和水位变化划分的时段数
 $\beta(k)$ ——可调叶片的安放角度,通常离散为 s 个整数值 $\{\beta(k) | k = 1, 2, \dots, s\}$
 $Q_{ij}(\beta(k))$ ——第 i 时段、第 j 台机组、叶片角度为 $\beta(k)$ 时的抽水流量
 H_{zi} ——第 i 时段的泵装置扬程
 $\eta_{zij}(\beta(k))$ ——第 i 时段、第 j 台机组、叶片角度为 $\beta(k)$ 时的泵装置效率
 η_{mot} ——电动机效率
 ρ ——水的密度 η_c ——传动效率
 ΔT_i ——第 i 时段划分的时间间隔长度
 P_i ——第 i 时段的峰谷电价
 W_e ——管理部门下达的日提水总量
 $Q_{j,\min}$ 、 $Q_{j,\max}$ ——第 j 台机组允许的最小、最大抽水流量

1.2 蚁群算法的基本原理

蚁群优化算法(Ant colony optimization algorithm, ACO)是模拟自然界蚂蚁觅食过程中相互协作行为的一种构造性算法^[12]。算法的基本思路是:将待求问题解的构造过程模拟为路径,分配多个人工蚂蚁构造可行解集,蚂蚁在路径上释放信息素,并共享信息,通过信息素不断地挥发和积累的正反馈过程达到优化的目的。蚁群算法是基于种群的元启发式算法,鲁棒性强,在实际问题中的应用表明蚁群算法能够为组合优化问题提供很好的解决方案。

1.3 投影寻踪方法原理

投影寻踪(Projection pursuit, PP)是处理和分析高维数据,尤其是高维非正态数据的一种新兴的统计方法^[13],具有稳健、抗干扰和高准确度等优点。用投影寻踪方法进行运行方案选优的基本思路是:选取方案的多个评价指标,把高维数据(评价指标)通过某种组合投影到一维子空间上,通过极大(小)化某个投影指标,寻找出能反映高维数据结构或特征的投影,在一维空间上对数据结构进行分析,以达到分析和研究高维数据的目的。泵站运行方案的优选涉及多个评价指标,各指标的量纲不一致,且权重难以确定,利用PP选优决策方法可有效地解决这些问题,降低主观因素对选优结果的影响^[14]。

2 泵站优化运行的分析求解和方案选优

2.1 模型的ACO求解

泵站优化运行属组合优化调度问题,其实质上是一个多阶段决策的过程,为使一定时间内泵站运行的总费用较小且满足额定抽水量要求,将时间按照泵装置扬程的变化结合峰谷电价进行离散,各个时段泵机组可能选择不同的运行方式。求解问题时人工蚂蚁从泵站内单台机组开始,按随机比例规则选择初始时段的一个运行工况,不断添加尚未被访问过的时段的运行工况,直到所有的时段都被访问,再对下一台机组重复这一过程,直至所有机组都被访问,完成解的构建,再通过算法迭代不断优化,获得问题的最优解。

为了便于利用ACO求解泵站优化运行问题,构造基于问题成分的有向赋权图 $G=(C,L)$, $C=\{c_{11}, \dots, c_{ik}, \dots, c_{Ts}\}$ 是图中结点的集合,结点对应于问题的成分,每个成分 c 表示机组的一个运行工况,包含了第 i 时段,第 j 台机组,叶片角度为 $\beta(k)$ 时泵的运行参数 $(Q_{ij}(\beta(k)), H_{zi}, \eta_{zij}(\beta(k)), P_i)$,泵在 ΔT_i 时段内运行该工况的抽水量和需要的电费定义为结点上的权值。 L 为连接结点的边。人工蚁群根据信息素及启发式信息,通过搜索图 G 中结点的序列来寻找问题的可行解,并根据ACO的优化机制找出问题的最优解。问题的描述图见图1。

ACO求解泵站优化运行的过程如下:

(1)将一天离散为 T 个时段、叶片安放角离散为 s 个点,设置蚁群算法的初始化信息。

(2)设置迭代次数或终止条件,开始循环迭代。图1中,人工蚂蚁从一个虚构的起始点(时段0)出发,根据伪随机比例规则沿各时段构造边,具体表述如下:产生 $[0,1]$ 上的随机数 q ,与当前决定搜索或

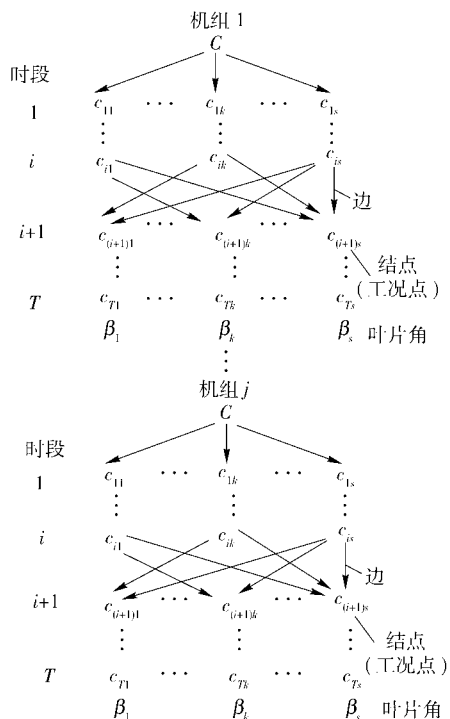


图1 泵站运行优化问题描述图

Fig. 1 Description scheme of pump operation optimization problem

利用的阈值参数 $q_0(0 \leq q_0 \leq 1)$ 作比较, $q \leq q_0$ 时,蚂蚁直接选择使启发式信息的指数与信息素量的指数乘积最大的下一结点;反之, $q > q_0$ 时,则使用随机选择策略来选择下一结点。所有时段结束,解构建完成,满足约束条件的存入可行解集合。随机概率计算式为

$$P_k(i,j) = \frac{\tau(i,j)^\alpha \eta(i,j)^\gamma}{\sum_{u=1}^s \tau(i,u)^\alpha \eta(i,u)^\gamma} \quad (1)$$

式中 $\eta(i,j)$ ——启发式信息,表示由结点 i 转移到结点 j 的期望程度

$\tau(i,j)$ ——边 (i,j) 上的信息素量

α, γ ——预先设定的参数,用来控制启发式信息与信息素浓度作用的重要程度

式(1)为人工蚂蚁 k 由当前所在的时段结点 i 转移到下一时段结点 j 的概率。

(3)信息素更新。

$$\tau(i,j) = (1 - \rho)\tau(i,j) + \rho\Delta\tau^*(i,j) \quad (2)$$

式中 $\Delta\tau^*(i,j)$ ——至今最优解对应边上信息素的更新量

ρ ——信息素挥发系数

使用式(2)表达的信息素全局更新规则更新最优解对应边上的信息素,这里仅对至今最优解进行信息素的更新。

(4)检查迭代终止条件,若不满足,转步骤(2)

继续迭代,满足则输出问题的最优解。

2.2 ACO 针对泵站优化运行的改进

影响 ACO 性能的两个重要因素是人工蚂蚁的开发与探索,即开发系统至今所积累的搜索经验和探索未被访问的或相对未被探索的搜索区域。ACO 计算最终的目的是尽可能地收敛到一个全局最优解,因此可通过问题本身的特性使得算法在可能出现最优解的区域多开发,多探索,以增强算法的收敛性。泵站优化运行问题中,目标是机组运行的电费最少,峰谷电价对各个时段运行工况的选择影响非常大,使得最优解的趋势一般为“峰时尽量少抽水,谷时尽量多抽水”,据此可对 ACO 中的启发式信息 $\eta(i,j)$ 、信息素更新量 $\Delta\tau^*(i,j)$ 进行设置。

启发式信息

$$\eta(i,j) = \begin{cases} \frac{C(i,j)}{\sum_{u=1}^s C(i,u)} & (\text{谷时}) \\ \frac{1}{C(i,j)} & (\text{峰时,平时}) \end{cases}$$

式中 $C(i,j)$ ——边 (i,j) 上的运行电费

信息素更新

$$\Delta\tau^*(i,j) = \begin{cases} c_1/C(i,j) & (\text{峰时,平时}) \\ c_2C(i,j) & (\text{谷时}) \end{cases}$$

式中 c_1, c_2 ——常数

2.3 优化运行结果的选优策略

人工蚂蚁经多次搜索迭代后,最优解路径上的信息素越来越浓,被选中的概率也越来越大,这种正反馈作用促使 ACO 找到问题的最优解。最优解包含全局最优解和多个局部最优解,在泵站优化运行模型中,最优解的评价指标是运行电费,但可能存在这样的情况,全局最优解(运行电费最小的方案)对应机组的运行效率并不高,叶片可能会调节很多次,而另一局部最优解对应的方案虽然运行电费略高,也许相差很小,但是机组效率却比较高,叶片不需要调节很多次,因此更容易在实际运行中实施。因此以运行电费作为方案选择的唯一评价指标有局限性,应当综合多个评价指标进行方案的选优,使优选出的方案更加合理,这里提出利用 PP 方法对泵站运行的方案进行优选,其决策的过程分为以下 4 个步骤。

(1)评价指标值的归一化处理。设各指标值的样本集为 $\{x(i,j) | i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,p\}$ 。其中 $x(i,j)$ 为第 i 个样本第 j 个指标值, n, p 分别为样本的个数和指标的数目。为消除各指标的量纲和统一指标值的变化范围,可进行极值归一化处理。

$$x^*(i,j) = \begin{cases} \frac{x(i,j) - \min x(j)}{\max x(j) - \min x(j)} & (\text{指标越大越优}) \\ \frac{\max x(j) - x(i,j)}{\max x(j) - \min x(j)} & (\text{指标越小越优}) \end{cases}$$

式中 $x^*(i,j)$ ——归一化之后的指标值

$\min x(j), \max x(j)$ ——样本集中第 j 个指标的最小值和最大值

(2)构造投影指标函数。PP 方法就是把 p 维数据 $\{x(i,j) | j=1,2,\dots,p\}$ 综合成以单位长度向量 $\mathbf{a} = (a(1), a(2), \dots, a(p))$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$ 。

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i,j) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

投影指标函数可构造为

$$Q(\mathbf{a}) = S_z D_z$$

式中 S_z ——投影值 $z(i)$ 的标准差

D_z ——投影值 $z(i)$ 的局部密度

$$S_z = \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - \bar{z}]^2 / (n-1) \right\}^{0.5}$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (R - r_{ij}) u(R - r_{ij})$$

其中 $r_{ij} = |z(i) - z(j)|$ $u(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$

式中 \bar{z} ——序列 $\{z(i) | i=1,2,\dots,n\}$ 的均值

R ——求局部密度的窗口半径,一般可取值为 $0.1S_z$

r_{ij} ——距离

$u(t)$ ——单位阶跃函数

(3)优化投影指标函数。当各指标值的样本集给定时,投影指标函数 $Q(\mathbf{a})$ 只随投影方向 \mathbf{a} 的变化而变化。不同的投影方向反映不同的数据结构特征,最佳投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向。可通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向,即

$$\max Q(\mathbf{a}) = S_z D_z$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$$

这是一个以 $\{a(j) | j=1,2,\dots,p\}$ 为优化变量的复杂非线性优化问题,求解该问题即可获得最佳的投影方向 \mathbf{a}^* ,将 \mathbf{a}^* 代入式(3)后,即得各方案的投影值 $z^*(i)$ 。显然, $z^*(i)$ 值越大对应的方案 i 越优。对 $z^*(i)$ 值从大到小排序,最大的 $z^*(i)$ 值所对应的方案 i 就是最优方案。

3 算例求解与分析

江都四站安装了 7 台套立式轴流泵,机组额定转速 $n = 150 \text{ r/min}$,叶轮直径为 $2\,900 \text{ mm}$ 。水泵叶片为液压全调节,设计叶片安放角 $\beta = 0^\circ$,调节范围

为 $[-4^\circ, 4^\circ]$,电动机额定功率 $N_0 = 3\ 440\ \text{kW}$,取电动机效率 $\eta_{\text{mot}} = 0.94$,直联传动效率 $\eta_c = 1$ 。要求机组满负荷运行,提水量大于 $1.239 \times 10^7\ \text{m}^3/\text{d}$ 。江都四站设计日均扬程:设计站下日平均水位 $0.7\ \text{m}$,站上设计水位 $8.5\ \text{m}$,运行过程中基本不变,设计日均扬程为 $7.8\ \text{m}$ 。典型潮位过程:以枯水月份12月、1月、2月的长江三江营站平均潮位过程为典型潮位过程。该处这3个月的平均高潮位 $1.48\ \text{m}$ 、平均低潮位 $0.28\ \text{m}$,平均潮位 $0.88\ \text{m}$,平均潮差 $1.2\ \text{m}$,平均涨潮历时 $3.62\ \text{h}$,落潮历时 $8.82\ \text{h}$,总计 $24.85\ \text{h}$ 。根据江苏省

物价局现行规定的峰谷分时销售电价:峰($7:00 \sim 11:00, 17:00 \sim 21:00$)对应电价 $0.978\ \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;非峰谷($11:00 \sim 17:00, 21:00 \sim 23:00$)对应电价 $0.587\ \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;谷($23:00 \sim 7:00$)对应电价 $0.276\ \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。江都四站一天运行中不同时段对应的机组工作参数见表1^[5]。根据运行参数,对江都四站进行叶片全调节日优化运行分析,表2为常规的江都四站日运行方案,表3列出了利用动态规划逐次逼近法计算得到的日优化运行方案^[15],表5列出了利用蚁群算法计算得到的日优化运行方案。

表 1 不同时段对应的机组工作参数

Tab. 1 Working parameters of pumping unit in different periods

时段	时均扬程/m	叶片角/ $(^\circ)$	流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	效率/%	分时电价/ $\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	时段	时均扬程/m	叶片角/ $(^\circ)$	流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	效率/%	分时电价/ $\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
I (17:00 ~ 19:00), 2 h	8.06	-4.0	28.10	73.80	0.978	VI (07:00 ~ 09:00), 2 h	7.50	-4.0	29.70	76.10	0.978
		-2.0	30.50	74.70				-2.0	32.40	77.10	
		0.0	33.00	76.10				0.0	35.20	78.40	
		2.0	35.90	78.30				2.0	37.70	79.10	
II (19:00 ~ 21:00), 2 h	7.46	-4.0	29.90	76.20	0.978	VII (09:00 ~ 11:00), 2 h	7.36	-4.0	30.20	76.60	0.978
		-2.0	32.60	76.20				-2.0	32.90	77.50	
		0.0	35.30	77.20				0.0	35.70	78.60	
		2.0	37.80	79.10				2.0	38.10	79.00	
III (21:00 ~ 23:00), 2 h	7.40	-4.0	30.10	76.40	0.587	VIII (11:00 ~ 14:00), 3 h	7.69	-4.0	29.20	75.30	0.587
		-2.0	32.80	77.40				-2.0	31.80	76.50	
		0.0	35.50	78.50				0.0	34.50	77.90	
		2.0	38.00	79.00				2.0	37.10	79.00	
IV (23:00 ~ 03:00), 4 h	7.82	-4.0	28.80	74.80	0.276	IX (14:00 ~ 17:00), 3 h	8.09	-4.0	28.00	73.30	0.587
		-2.0	31.30	75.90				-2.0	30.30	74.50	
		0.0	34.00	77.40				0.0	32.90	75.90	
		2.0	36.70	77.80				2.0	35.80	78.20	
V (03:00 ~ 07:00), 4 h	8.13	-4.0	27.90	73.50	0.276			-4.0	27.90	73.50	
		-2.0	30.20	74.20				-2.0	30.20	74.20	
		0.0	32.70	75.70				0.0	32.70	75.70	
		2.0	35.60	78.00				2.0	35.60	78.00	
		4.0	38.30	77.80			4.0	38.30	77.80		

表 2 江都四站常规日运行方案

Tab. 2 Routine operation scheme of No. 4 Jiangdu pumping station

时段	时均扬程/m	叶片角/ $(^\circ)$	机组台数	单机流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	水量/ $\text{万}\ \text{m}^3$	效率/%	费用/万元
I	8.06	0	7	33.0	166.32	76.1	4.99
II	7.46	0	7	35.3	177.91	77.2	4.87
III	7.40	0	7	35.5	178.92	78.5	2.87
IV	7.82	0	7	34.0	342.72	77.4	2.77
V	8.13	0	7	32.7	329.62	75.7	2.83
VI	7.50	0	7	35.2	43.51	78.4	1.18
VII	7.36						
VIII	7.69						
IX	8.09						
合计					1 239		19.51

表3 动态规划逐次逼近法求得的多机组日优化运行方案

Tab.3 Optimal operation scheme got by calculation of dynamic programming with successive approximation

时段	时均扬程/m	叶片角/(°)	机组台数	单机流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	水量/ 万 m^3	效率/%	费用/万元
I	8.06		0				
II	7.46		0				
III	7.40	-4	4	30.33	87.35	76.65	1.43
IV	7.82	4	7	39.50	398.16	81.20	3.06
V	8.13	2	7	35.40	356.83	77.80	2.98
VI	7.50		0				
VII	7.36		0				
VIII	7.69	3	7	38.17	288.57	78.87	4.78
IX	8.09	1	3	34.32	111.20	78.09	1.96
合计					1 242.11		14.21

表4 优化运行方案的投影寻踪评价

Tab.4 Projection pursuit evaluation for optimal operation schemes

方案	运行电费/万元	叶片调节次数	运行时间/h	平均效率/%	消耗功率/kW	PP 投影值
1	13.905 1	0	88	78.56	109 766	1.384 2
2	13.892 0	2	89	78.49	107 863	0.489 6
3	13.812 0	1	89	78.56	107 912	1.384 3
4	13.963 8	1	89	78.59	108 246	1.384 2
5	13.879 2	2	91	78.52	108 484	0.486 8
指标属性	越小越优	越小越优	越小越优	越大越优	越小越优	越大越优

表5 蚁群算法求得的多机组日优化运行方案

Tab.5 Optimal operation scheme got by calculation of ACO

时段	时均扬程/m	叶片角/(°)	机组台数	单机流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	水量/ 万 m^3	效率/%	费用/万元
I	8.06		0				
II	7.46		0				
III	7.40	4	6	40.6	175.39	78.8	2.80
IV	7.82	4	7	39.4	397.15	78.9	3.15
V	8.13	4	7	38.3	386.06	77.8	3.22
VI	7.50		0				
VII	7.36		0				
VIII	7.69	2	7	37.1	280.48	79.0	4.64
IX	8.09		0				
合计					1 239.1		13.81

利用 ACO 计算江都四站多机组日优化运行,运用 Matlab 编程实现,取:信息素因子 $\alpha = 1$,启发式信息因子 $\gamma = 15$,蚂蚁数量 $m = 150$,信息素挥发量 $\rho = 0.3$,信息素阈值 $q_0 = 0.5$,常数 $c_1 = 0.1$,常数 $c_2 = 10$,迭代次数为 50 次。经计算,得到运行电费较小的 5 种方案,结果见表 4。选取运行电费、叶片调节次数、机组运行时间、机组运行时的平均效率、机组运行消耗的总功率作为评价指标,用 PP 方法对这 5 种方案进行评价,结果列于表 4 的最后一列。

由表 4 可以看出,方案 1、方案 3 和方案 4 的 PP 投影值非常接近,比较这 3 个方案,方案 1 叶片调节次数少,运行时间短;方案 3 较方案 1 叶片调节次数多 1 次,运行时间多 1 h,但是运行电费少了 931 元,

且消耗的功率少了 1 854 kW;方案 4 较方案 3 除平均效率略高外,其他无明显优势。综合分析,选取方案 3 为决策方案,最优方案对应的运行参数见表 5。

对比表 2、表 3 和表 5,表 5 计算结果的运行电费较表 2 中的运行电费减少了 29.2%;在同等级散情况下,蚁群算法的计算结果较动态规划逐次逼近法的计算结果更优,其运行电费减少了 2.8%,经济效益巨大;叶片调节次数减少了 3 次,机组运行时间减少了 5 h,运行可靠性更高,可见蚁群算法应用于泵站优化运行能实现更好的性能。

4 结论

(1) 针对泵站多机组的组合优化调度问题,建

立了包含开停机约束的泵站多机组优化运行数学模型,利用蚁群算法求解,并根据问题的特性对算法中启发式信息和信息素的更新方式做出了改进。

(2)选取运行电费、叶片调节次数、泵机组运行时间、运行效率和消耗的功率作为评价指标,建立了泵站优化运行方案的投影寻踪选优决策模型,得出多个运行方案的优劣顺序,进行决策。决策方案综合考虑了多种因素,切合实际,可操作性强。

(3)泵站多机组日优化运行算例的结果表明,

同等离散情况下,改进蚁群算法得到的结果优于动态规划逐次逼近法的结果。泵站日耗电费按设计工况运行时为19.51万元,按动态规划逐次逼近法计算得的优化方案运行时为14.21万元,按蚁群算法计算得的优化方案运行时为13.81万元,蚁群算法的计算结果相比前者分别节省了29.2%和2.8%,且运行方案叶片调节次数少,机组运行时间短,优化效果明显,说明蚁群算法经改进后能够较好地应用于此类复杂的组合优化问题。

参 考 文 献

- 刘超. 泵站经济运行[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- 冯晓莉,仇宝云,王斐,等. 南水北调东线高港泵站优化运行方案研究[J]. 水利学报,2010,41(4):412~418.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Wang Fei, et al. Study on optimal operation schemes of Gaogang pumping station in Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(4):412~418. (in Chinese)
- 龚懿,程吉林,张仁田,等. 泵站多机组叶片全调节优化运行分解-动态规划聚合方法[J]. 农业机械学报,2010,41(9):27~31.
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Study of optimal operation method on multiple pump units with adjustable-blade for single pumping station based on decomposition-dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):27~31. (in Chinese)
- 刘超,耿卫明. 泵站经济运行的数值解法[J]. 排灌机械,2004,22(3):14~17.
Liu Chao, Geng Weiming. Numerical solution on economical operation for pump station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004,22(3):14~17. (in Chinese)
- 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.
Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian, et al. Study on optimal daily operation of single adjustable-blade pump unit in pumping station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(4):499~504. (in Chinese)
- 冯晓莉,仇宝云,黄海田,等. 南水北调东线一期工程源头泵站优化运行研究[J]. 水力发电学报,2008,27(4):48~53.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Huang Haitian, et al. Study on source pump station optimal operation of first stage Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(4):48~53. (in Chinese)
- 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)
- 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.
- Zecchin A C, Simpson A R, Maier H R, et al. Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006,44(5~6):451~468.
- 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.
- Arce A, Ohishi T, Soares S. Optimal dispatch of generating units of the itaipú hydroelectric plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002,17(1):154~158.
- Dorigo M. 蚁群优化[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- 金菊良,丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都:四川科技大学出版社,2002.
- 王柏,张忠学,李芳花,等. 基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价[J]. 农业工程学报,2012,28(2):84~89.
Wang Bai, Zhang Zhongxue, Li Fanghua, et al. Comprehensive evaluation of regulated deficit irrigation using projection pursuit model based on improved double chains quantum genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(2):84~89. (in Chinese)
- 张礼华,程吉林,张仁田,等. 江都四站站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.
Zhang Lihua, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Research on optimal operation mode for multi units with adjustable-blade in Jiangdu No.4 pumping station[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2010,13(2):75~78. (in Chinese)