

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.06.008

## 泵站变角变速组合优化运行算法

龚懿<sup>1</sup>, 程吉林<sup>1</sup>, 张仁田<sup>1,2</sup>, 皇甫全欢<sup>3</sup>

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009; 3. 淮安市水利局, 江苏 淮安 223001)



龚懿

**摘要:** 建立了泵站多机组叶片全调节与变频变速组合优化运行数学模型, 提出了基于动态规划逐次逼近法的大系统分解-动态规划聚合求解方法. 以泵站日提水耗电费用最小为目标、机组提水量为协调变量, 将该模型分解为若干个单机组叶片全调节与变频变速组合日优化运行子模型. 该子模型以机组叶片安放角及机组转速为决策变量、机组提水量的离散值为状态变量, 采用动态规划逐次逼近法求解. 构造的聚合模型以各机组提水量为决策变量、泵站提水量的离散值为状态变量, 采用动态规划方法求解. 以某泵站运行为例, 在满负荷、80% 负荷、60% 负荷下, 各日均扬程下泵站多机组叶片全调节与变频变速组合日优化运行较定角恒速运行平均单位提水费用分别节约 5.80%、25.19%、32.20%.

**关键词:** 泵站; 多机组; 叶片全调节; 变频变速; 动态规划; 逐次逼近

**中图分类号:** S277.9; TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)06-0496-05

龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 泵站变角变速组合优化运行算法[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 496-500.

## Algorithm of optimal operation with adjustable-blade and variable speed for pumping station

Gong Yi<sup>1</sup>, Cheng Jilin<sup>1</sup>, Zhang Rentian<sup>1,2</sup>, Huangfu Quanhuan<sup>3</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co. Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 3. Water Conservancy Bureau of Huai'an City, Huai'an, Jiangsu 223001, China)

**Abstract:** A mathematical model of optimal operation with adjustable-blade and variable speed for multiple pump units in pumping station was made and a decomposition-dynamic programming aggregation method based on DPSA was proposed. With minimal daily electric consumption as the target, water quantity pumped by units as coordinated variable, the above-mentioned model was decomposed into several sub-models of daily optimal operation with adjustable-blade and variable speed for single pump unit. The sub-model took the blade angle and pump speed as decision variables, the discrete values of water quantity pumped by each unit as state variable, and was solved by applying DPSA. The constructed aggregation model took water quantity pumped by each pump unit as decision variable, the discrete values of water quantity pumped by pumping station as state variable, and was solved by dynamic programming method. Taking the operation of a pumping station as a case, the optimal operation of multiple pump units with adjustable-blade and variable speed has average cost saving of 5.80%, 25.19% and 32.20% under 100%, 80%, and 60% loads respectively.

收稿日期: 2012-09-05; 网络出版时间: 2013-06-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130603.1131.017.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974099); 江苏省属高校自然科学重大项目(09KJA570001); 2012年度扬州大学科技创新培育基金资助项目(2012CXJ040)

作者简介: 龚懿(1983—), 男, 江苏常熟人, 讲师, 博士(gongyi\_8@163.com), 主要从事水利水电工程管理决策理论及应用研究。  
程吉林(1963—), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士生导师(jlcheng@yzu.edu.cn), 主要从事水利规划优化理论与应用研究。

**Key words:** pumping station; multiple pump units; adjustable-blade; variable with VFD; dynamic programming; successive approximation

大型泵站运行时能耗大,优化运行势在必行.目前常用的优化运行方式主要为叶片调节和变频变速调节,其原理是考虑泵站扬程及泵站进、出水池水位差变化,通过调节叶片角度(或转速),使泵站尽可能运行在高效率区,以获得泵站节能效益.大型泵站优化运行主要以在泵站扬程变化过程中满足某一时段提水总量要求时运行费用最小为目标,如何采用工况调节方式,合理地进行扬程、流量和功率组合,是保证泵站优化运行的关键性问题.目前,大型低扬程泵站多采用叶片全调节的轴流泵和混流泵,通过调节叶片安放角可在较大范围内适应扬程和流量变化,且保持运行在高效率区.随着变频设备在南水北调等大型泵站中的应用,大型泵站(群)变频变速优化运行已引起人们的关注<sup>[1-2]</sup>.

已有的文献<sup>[3-4]</sup>中,采用系统工程理论开展泵站单机和多机组叶片全调节优化运行的研究结果已获得较好的优化效益.龚懿等<sup>[2]</sup>针对南水北调东线淮阴三站,采用变频变速调节方式开展优化运行研究,获得了较定角恒速运行时更优的效益,由此更证实了大型泵站优化运行采用变频变速调节方式具有广泛应用前景.龚懿等<sup>[5]</sup>针对并联泵站(群)开展优化运行研究,虽然既包含叶片全调节运行,又包含变频变速运行,但对于其中的单个泵站,还是仅为叶片全调节,或仅为变频变速运行.由于泵站多机组优化运行时涉及叶片安放角、机组转速及开机台数等3个决策变量,采用传统的优化算法<sup>[6-8]</sup>求解较困难,尚未见相关研究报道.文中拟用复杂系统理论,在分别进行泵站多机组叶片全调节和变频变速调节日优化运行研究基础上<sup>[2,4]</sup>,考虑动态规划法在求解阶段可分的复杂非线性问题上的可行性<sup>[9]</sup>,将动态规划逐次逼近法(dynamic programming successive approximation, DPSA)与大系统分解-动态规划聚合方法相结合,对泵站多机组叶片全调节与变频变速组合日优化运行展开研究.

## 1 优化运行模型及求解方法

定义:①运行方式,即在运行中,各阶段根据运行工况同时调节水泵叶片角度与机组转速,使运行费用最低,称为叶片全调节与变频变速组合优化运行.定角恒速运行定义参见文献[5].②满负荷、

80%负荷、60%负荷工作,参见文献[5]定义.③开机时刻与时段长度、峰谷电价组合,参见文献[5]定义.

### 1.1 数学模型

以泵站多机组日开机运行总耗电费用最小为目标函数、全天24h划分的若干时段为阶段变量、各机组各时段叶片安放角及机组转速为决策变量、规定时段内的泵站提水量及各机组电动机轴功率为约束条件,构建如下泵站多机组叶片全调节与变频变速组合日运行优化数学模型.

1) 目标函数为

$$F = \min \sum_{j=1}^{L_1} F_j = \min \left( \sum_{j=1}^{L_1} \sum_{i=1}^{L_2} \frac{\rho g Q_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji}) H_{ji}}{\eta_{z,ji} \eta_{mot,j} \eta_{int,j} \eta_{t,j}} \Delta t_i C_i \right), \quad (1)$$

式中: $F$ 为泵站1d运行最小耗电费用,万元; $F_j$ 为第 $j$ 台机组1d运行耗电费用,万元; $L_1$ 为泵站机组台数; $L_2$ 为1d划分的时段数; $\rho$ 为水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $g$ 为重力加速度; $Q_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji})$ 为泵站内第 $j$ 台机组、第 $i$ 时段,对应于叶片安放角 $\theta_{ji}$ 及机组转速 $n_{ji}$ 的流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $H_{ji}$ 为泵站内第 $j$ 台机组、第 $i$ 时段的时均泵站扬程, $\text{m}$ ; $\Delta t_i$ 为第 $i$ 时段的时段长, $h$ ; $C_i$ 为第 $i$ 时段的峰谷电价, $\text{元}/\text{kW} \cdot \text{h}$ ; $\eta_{z,ji}$ , $\eta_{mot,j}$ , $\eta_{int,j}$ , $\eta_{t,j}$ 分别为站内第 $j$ 台机组的装置效率、电动机效率、传动效率和变频装置效率, $\eta_{z,ji}$ 与 $i$ 时段流量、扬程有关;在负荷大于60%时,可以认为电动机效率 $\eta_{mot,j}$ 基本不变,大型电机的 $\eta_{mot,j}$ 值在94%左右;直联机组的传动效率 $\eta_{int,j}$ 为1;大功率PWM高压变频器的变频效率 $\eta_{t,j}$ 在96%左右.

2) 总水量约束为

$$\sum_{j=1}^{L_1} \sum_{i=1}^{L_2} Q_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji}) \Delta t_i \geq V_e, \quad (2)$$

式中: $V_e$ 为上级管理部门下达的日提水总量, $\text{m}^3$ .

3) 功率约束为

$$P_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji}) \leq P_{j0}, \quad (3)$$

式中: $P_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji})$ 为泵站内第 $j$ 台机组、第 $i$ 时段对应于叶片安放角 $\theta_{ji}$ 及机组转速 $n_{ji}$ 的实际功率, $\text{kW}$ ,且应小于电动机额定功率 $P_{j0}$ .

该模型与文献[5]所述模型相比较,区别在于:该模型与文献[5]中的大系统第1级分解子模型表述一致,两者模型中决策变量皆为机组开机台数、

机组叶片安放角和机组转速,但文献[5]所述模型对于单个泵站而言仅为叶片全调节,或仅为变频变速调节,实质上还是1种工况调节方式;而文中针对单个泵站研究的是2种工况调节方式,即既是叶片全调节,同时又是变频变速调节。

## 1.2 分解-动态规划聚合方法

### 1.2.1 大系统分解

以各机组间的水量分配为协调变量,将多机组叶片全调节与变频变速组合日优化运行问题分解为若干独立的单机组叶片全调节与变频变速组合日优化运行问题,参见文献[5]第2级子系统优化。

### 1.2.2 子系统动态规划逐次逼近优化

由大系统分解得到的子系统为一复杂非线性模型,若各时段叶片安放角或机组转速已知,则转换为一维动态规划模型,可采用DPSA求解。若子系统提水目标值 $V_j$ 已知,给定单机组各时段初始转速 $n_{1i}(i=1, \dots, L_2)$ ,采用一维动态规划法进行叶片全调节优化运行计算,获得满足提水量要求及功率约束的单机组各时段优化叶片安放角 $\theta_{1i}$ ;再固定此叶片安放角路径,同样采用一维动态规划法进行变频变速优化运行计算,获得机组2次优化转速路径 $n_{2i}$ ;再固定此机组各时段转速路径,以此循环计算,直至满足模型给定控制精度 $\varepsilon$ ,获得最终的子系统优化运行叶片安放角及转速 $(\theta_i, n_i)$ 。

以上为给定单机组1个提水量要求下的叶片全调节与变频变速组合优化计算。以一定步长离散单机组1d最大提水能力(即各时段满足功率要求的最大叶片角度及最大机组转速下运行时的提水总量) $V_{jmax}$ ,采用单机组组合日优化运行模型分别计算各水泵单机组对应不同提水量 $V_{jm}(m=1, 2, \dots, m_{max})$ 要求下的最小提水费用 $F_{jm}$ 。考虑同一泵站内机组型号相同且无性能差异,故系统只需进行 $m$ 次不同提水量 $V_{jm}$ 离散下的DPSA计算。由此获得一系列 $V_{jm}-F_{jm}(V_{jm})$ 关系,及对应每个 $V_{jm}$ 的优化运行叶片安放角及转速 $(\theta_i, n_i)$ 。

### 1.2.3 大系统动态规划聚合

由上述各子系统优化计算,获得一系列 $V_{jm}-F_{jm}(V_{jm})$ 关系( $j=1, 2, \dots, L_1$ ),则模型(1)-(3)可转化为聚合模型,参照文献[4],采用大系统动态规划聚合求解方法,在获得各机组最优提水量组合 $V_n^*$ 后,回查子系统优化成果,可得到各水泵机组的最优开机方式,从而获得泵站各机组各时段叶片安放角 $\theta$ 与机组转速 $n$ 组合优化路径。

## 2 某泵站组合日优化运行算例

### 2.1 泵站基本情况

某泵站安装立式轴流泵4台(其中1台备机),工频转速为 $n=150$  r/min;叶轮直径为2900 mm;单机流量为 $33.4$  m<sup>3</sup>/s,配套电动机功率为 $P_0=3500$  kW。水泵叶片为液压全调节方式,额定叶片安放角 $\theta=0^\circ$ ,其调节范围为 $-4^\circ \sim +4^\circ$ 。该泵站在机组转速150 r/min下,设置 $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$ 这5种离散叶片安放角度,对应的水泵装置性能曲线拟合方程如表1所示。

表1 转速150 r/min时某泵站不同叶片安放角水泵性能方程

Tab.1 Performance equations of pumping station with different blade angles at constant speed of 150 r/min

$\theta/(^\circ)$	曲线名称	性能曲线方程
-4	H-Q	$H = -0.0098Q^2 + 0.2091Q + 6.3404$
	$\eta$ -Q	$\eta = -0.0104Q^3 + 0.4722Q^2 - 2.8754Q + 10.82$
-2	H-Q	$H = -0.0136Q^2 + 0.4761Q + 2.8099$
	$\eta$ -Q	$\eta = -0.0136Q^3 + 0.8549Q^2 - 14.548Q + 108.08$
0	H-Q	$H = -0.0107Q^2 + 0.36Q + 4.2028$
	$\eta$ -Q	$\eta = -0.0122Q^3 + 0.8193Q^2 - 14.765Q + 107.83$
+2	H-Q	$H = -0.0119Q^2 + 0.5079Q + 1.4554$
	$\eta$ -Q	$\eta = -0.0154Q^3 + 1.216Q^2 - 28.84Q + 254.57$
+4	H-Q	$H = -0.0132Q^2 + 0.6449Q - 1.0705$
	$\eta$ -Q	$\eta = -0.0179Q^3 + 1.5546Q^2 - 41.962Q + 404.11$

对该泵站安装变频装置,调速区间设定为[130, 160] r/min。根据相似定律,假定效率不变,对转速150 r/min时各叶片安放角度下水泵性能曲线方程进行相似性换算,获得不同转速下对应的水泵性能曲线方程。以叶片安放角度 $0^\circ$ 为例,根据相似律 $H_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 H_2$ 和 $Q_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) Q_2$ ,则有

$$H(n) = -0.0107Q^2 + 0.0024nQ + 4.2028 \left(\frac{n}{150}\right)^2, \quad (4)$$

$$\eta(n) = -41175 \left(\frac{Q}{n}\right)^3 + 18435.25 \left(\frac{Q}{n}\right)^2 - 2214.75 \left(\frac{Q}{n}\right) + 107.83. \quad (5)$$

该泵站上、下游均为容积足够大的输水河道,日均扬程 $H_{av}$ 变幅很小,因此认为其日均泵站扬程不变。假定泵站最大扬程4.93 m,最小扬程3.13 m,以0.2 m步长离散成10个日均扬程。各日均扬程下,考虑定角恒速运行时的满负荷、80%负荷及60%负

荷水量作为优化目标水量,采用基于动态规划逐次逼近的大系统分解-动态规划聚合方法求解,计算各日均扬程不同水量约束下泵站多机组组合日优化运行最小提水费用对应的单位提水费用。

2.2 优化运行结果

图1为多机组组合日优化运行单位提水费用,图2为多机组组合日优化运行较定角恒速运行单位费用节省幅度。

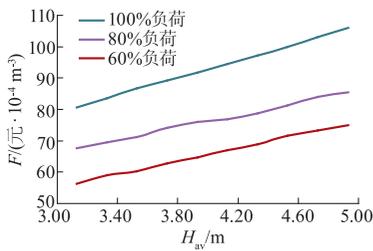


图1 多机组组合日优化运行单位提水费用

Fig.1 Unit cost of water pumping under optimal operation of multiple pump units with adjustable-blade and variable speed

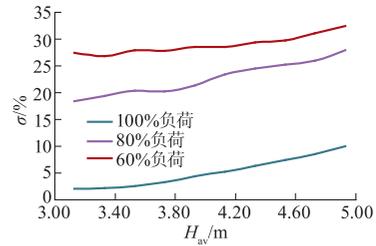


图2 多机组组合日优化运行较定角恒速运行单位费用节省幅度

Fig.2 Cost saving of optimal operation of multiple pump units with adjustable-blade and variable speed compared with operation with fixed blade angle and constant speed

由上述模型求解可得不同日均泵站扬程(3.13~4.93 m)、不同负荷(100%,80%,60%)、不同峰谷电价时,泵站多机组组合优化运行方案,如表2所示.日均扬程3.73 m、100%负荷,日均扬程3.93 m、80%负荷,日均扬程4.13 m、60%负荷3种典型工况下日优化运行方案,对应单位提水费用F下分别为89.24,75.95,67.07元/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

表2 典型日均扬程、典型负荷下泵站多机组组合日优化运行方案

Tab.2 Optimal operation schemes of multiple pump units with adjustable-blade and variable speed for pumping station under typical daily average heads and water pumping loads

$H_{av}/m$	负荷	机组编号	调节参数	时段编号								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.73	100%	机组1	$\theta$	停机	0	0	+2	+2	0	0	0	0
			$n$	160	160	160	160	160	160	160	160	
		机组2	$\theta$	停机	0	0	+2	+2	0	0	0	0
			$n$	160	160	160	160	160	160	160	160	
		机组3	$\theta$	停机	停机	0	+2	0	0	0	0	0
			$n$	160	160	160	160	160	160	160	160	
3.93	80%	机组1	$\theta$	停机	停机	0	+4	+4	停机	0	0	0
			$n$	160	160	160	160	160	160	160	160	
		机组2	$\theta$	停机	停机	-2	+4	+4	停机	停机	0	0
			$n$	155	160	160	160	160	160	160	160	
		机组3	$\theta$	停机	停机	-2	+4	+4	停机	停机	0	0
			$n$	155	160	160	160	160	160	160	160	
4.13	60%	机组1	$\theta$	停机	停机	0	+2	0	停机	停机	0	0
			$n$	160	160	160	160	160	160	160	160	
		机组2	$\theta$	停机	停机	-2	+2	+2	停机	停机	停机	0
			$n$	155	160	160	160	160	160	160	160	
		机组3	$\theta$	停机	停机	-4	0	0	停机	停机	停机	停机
			$n$	155	160	160	160	160	160	160	160	

2.3 优化运行成果分析

应用基于动态规划逐次逼近法的大系统分解-动态规划聚合法,对该泵站各日均扬程不同提水负荷要求进行多机组组合日优化运行计算,并对获得的图表进行分析,得出以下结果:

1) 满负荷、80%负荷、60%负荷下,各日均扬程下泵站多机组叶片全调节与变频变速组合日优化

运行平均单位提水费用分别为103.62,84.96,73.19元/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;较定角恒速运行分别平均节约5.80%,25.19%,32.20%。

2) 由表2可知,机组在叶片全调节与变频变速组合优化运行时,尽可能在高速下调节叶片安放角度,进而达到优化效果.也即在工况调节方式选择上,优先采用叶片全调节方式。

3) 由图2可知,3种提水负荷下,60%负荷的优化运行效益最高;且同一提水负荷下,优化运行效益随日均扬程的升高而提高.在提水负荷较小、提水扬程较高时,泵站优化运行时工况调节余地较大,可获得较高的优化效益;反之,由于受机组功率及提水量约束,优化效益不够显著.

4) 结合图1,2可知,在提水负荷一定的条件下,单位提水费用随日均扬程升高而增大,但总体上单位提水费用节约百分比也随之增大.

### 3 结 论

1) 针对泵站多机组叶片全调节与变频变速组合日优化运行数学模型,提出基于动态规划逐次逼近的大系统分解-动态规划聚合法,优化成果较好.

2) 用该方法求解获得同一时段内各机组在不同叶片安放角度及机组转速下的最优运行方式.

3) 考虑峰谷分时电价的影响,通过对典型泵站的计算分析,建立了不同日均扬程及提水负荷要求下的泵站多机组日运行优化调度预案,可供兼有叶片全调节与变频变速工况调节方式的泵站优化运行参考,可为梯级泵站站间优化运行提供理论基础.

4) 该方法可用于求解具有3决策变量的阶段可分的复杂非线性数学模型,丰富了大系统理论.

#### 参考文献 (References)

- [1] 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.  
Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian, et al. Optima methodology of single-unit variable speed operation in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 72-76. (in Chinese)
- [2] 龚懿,程吉林,张仁田,等. 淮阴三站变频变速优化运行的分解-动态规划聚合法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 79-83.  
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Optimization on variable speed operation with VFD for No. 3 Huaiyin pumping station based on decomposition-dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 79-83. (in Chinese)
- [3] 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 day-operation of single adjustable-blade pump unit in pumping station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 499-504. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 龚懿,程吉林,张仁田,等. 并联泵站群日优化运行方案算法[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 230-235.  
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Algorithm of daily operation scheme for parallel pumping stations[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 230-235. (in Chinese)
- [6] Mahdi Moradi Jalal, Bryan W Karney. Optimal design and operation of irrigation pumping stations using mathematical programming and Genetic Algorithm (GA)[J]. Journal of Hydraulic Research, 2008, 46(2): 237-246.
- [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] López-Ibáñez M, Prasad T D, Paechter B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(4): 337-346.
- [9] Cooper L, Cooper Mary W. Introduction to Dynamic Programming[M]. New York: Pergamon Press, 1981.

(责任编辑 朱漪云)