

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.006

泵站多机组叶片全调节优化运行分解-动态规划聚合方法*

龚 懿¹ 程吉林¹ 张仁田^{1,2} 张礼华¹

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

【摘要】 针对泵站多机组叶片全调节日优化运行数学模型,提出了大系统分解-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日优化运行子模型。该子模型以机组叶片安放角为决策变量,机组提水量的离散值为状态变量,采用动态规划方法求解。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,同样采用动态规划方法求解。该方法可解决安装不同型号泵机组或各机组性能存在差异的站内最优化运行问题。以淮安四站运行为例,获得了较好的优化效果。

关键词: 泵站 多机组 叶片全调节 优化运行模型 分解 聚合 动态规划
中图分类号: TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0027-05

Study of Optimal Operation Method on Multiple Pump Units with Adjustable-blade for Single Pumping Station Based on Decomposition-dynamic Programming Aggregation Method

Gong Yi¹ Cheng Jilin¹ Zhang Rentian^{1,2} Zhang Lihua¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract

A decomposition-dynamic programming aggregation method, which was applied to solve the mathematical model of daily optimal operation with adjustable-blade for multiple pump units in single pumping station, has been proposed. Taking minimal daily electric cost as objective function, the water quantity pumped by units as coordinated variable, this model was decomposed into several sub-models of daily optimal operation with adjustable-blade for single pump unit, in which the blade angle was taken as decision variable, the discrete values of water quantity pumped by each unit as state variable, and was solved by means of dynamic programming method. The constructed aggregation model takes 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 also solved by dynamic programming method. This method could solve the optimal operation issues for multiple pump units with different types or performance differences in single pumping station. Taking operation of No. 4 Huai'an Pumping Station as a study case, a set of optimization results was obtained.

Key words Pumping station, Multiple pump units, Adjustable-blade, Optimal operation model, Decomposition, Aggregation, Dynamic programming

收稿日期: 2009-12-07 修回日期: 2010-01-18
* 国家自然科学基金资助项目(60974099)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A03)、江苏省属高校自然科学重大项目(09KJA570001)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093250110002)
作者简介: 龚懿, 博士生, 主要从事水利水电工程管理决策理论及应用研究, E-mail: gongyi_8@163.com
通讯作者: 程吉林, 教授, 博士生导师, 主要从事水利规划优化理论与应用研究, E-mail: jlcheng@yzu.edu.cn

引言

南水北调东线工程泵站群规模大,运行成本高,对泵站优化运行方法的研究势在必行。泵站多机组优化运行研究方法主要有大系统遗传算法^[1]、动态规则法^[2]等,在以往的研究中,均假定同一泵站中各机组性能相同,并未考虑其存在的差异,因而也未涉及到泵站各机组在同一时段内不同叶片安放角度下的优化运行问题。但在实际工程中,即使安装相同型号的水泵,由于制造、安装及布置等因素的影响,各机组的性能不尽相同。目前,国内外将大系统分解-聚合法应用在水工结构优化^[3]、水库联合调度^[4]及多机组电力系统优化^[5]等领域,聚合时主要采用构造回归模型进行求解,取得了一定的优化效益。为此,本文首次考虑大系统分解-动态规划聚合方法在泵站多机组叶片全调节优化运行中的应用,构造的聚合模型采用动态规划方法求解。以江苏省淮安四站为例,按照峰谷电价的影响及大型泵站水泵机组不宜频繁开停机的要求将一日划分为若干时段,首次考虑同一时段内各水泵机组在不同叶片安放角度下的优化运行,探求泵站多机组叶片全调节运行的优化效益。

1 多机组叶片全调节日运行优化模型与求解方法

为方便讨论,作如下定义:

(1)运行方式:在运行过程中,泵机组以额定转速 150 r/min,叶片设计安放角 0°运行,称为定角恒速运行;泵机组转速恒定、各阶段根据运行工况调节水泵叶片角度,使之运行费用最低,称为叶片全调节优化运行。

(2)满负荷、80% 负荷、60% 负荷工作:泵机组 1 日 24 h 运行,即为满负荷工作。80%、60% 负荷,即对应于定角恒速运行方式时满负荷工作提水总量的 80%、60%。

(3)开机时刻与时段长度、峰谷电价组合:考虑峰谷电价和大型泵站不宜频繁开停机等要求,开机时刻取 17:00 并将每天划分为 9 个时段,各时段长度与峰谷电价组合如表 1 所示。

1.1 多机组叶片全调节日运行优化模型

以多机组日开机运行总耗电费用最小为目标函数,各时段各机组运行叶片安放角为决策变量,规定时段内的抽水量要求及水泵电动机额定功率为约束条件,建立如下多机组叶片全调节日优化运行数学模型。其中考虑峰谷电价及大型泵站不宜频繁开停机要求将每天划分为 S_N 时段。

表 1 时段划分及各时段峰谷电价
Tab.1 Time period division and peak-valley electricity price of each time period 元/(kW·h)

试验因素(时段)	电价
I (17:00 ~ 19:00) ,2 h	0.978
II (19:00 ~ 21:00) ,2 h	0.978
III (21:00 ~ 23:00) ,2 h	0.587
IV (23:00 ~ 03:00) ,4 h	0.276
V (03:00 ~ 07:00) ,4 h	0.276
VI (07:00 ~ 09:00) ,2 h	0.978
VII (09:00 ~ 11:00) ,2 h	0.978
VIII (11:00 ~ 14:00) ,3 h	0.587
IX (14:00 ~ 17:00) ,3 h	0.587

注:表中峰谷电价摘自 2008 年 7 月江苏省物价局公布的峰谷分时销售电价。

目标函数

$$F = \min \sum_{j=1}^{J_Z} F_j = \min \left(\sum_{j=1}^{J_Z} \sum_{i=1}^{S_N} \frac{\rho g Q_{i,j}(\theta_i) H_i}{\eta_{zi,j} \eta_{mot,j} \eta_{int,j}} \Delta T_i \Delta P_i \right) \quad (1)$$

总水量约束

$$\sum_{j=1}^{J_Z} \sum_{i=1}^{S_N} Q_{i,j}(\theta_i) \Delta T_i \geq W_e \quad (2)$$

功率约束

$$N_{i,j}(\theta_i) \leq N_{0,j} \quad (i = 1, 2, \cdots, S_N; j = 1, 2, \cdots, J_Z) \quad (3)$$

式中 F ——泵站日运行最小电费,元
 F_j ——第 j 台水泵机组日运行电费,元
 J_Z ——水泵机组台数,台
 S_N ——每天分割的运行时段数
 $Q_{i,j}(\theta_i)$ ——第 i 时段第 j 台水泵流量, m^3/s , 在扬程、转速一定时,为叶片安放角 θ_i 的函数
 H_i ——第 i 时段的时均扬程, m
 ΔT_i ——第 i 时段的时间长, h
 ΔP_i ——第 i 时段的峰谷电价, $\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
 $\eta_{zi,j}$ ——第 j 台水泵的装置效率, $\eta_{zi,j}$ 与第 i 时段流量、扬程有关
 $\eta_{mot,j}$ ——第 j 台水泵的电动机效率,在负荷大于 60% 时,可以认为基本不变
 $\eta_{int,j}$ ——第 j 台水泵的传动效率,直联机组的传动效率 $\eta_{int,j}$ 为 1
 W_e ——泵站日目标提水总量, m^3
 $N_{i,j}(\theta_i)$ ——第 i 阶段第 j 台水泵对应于叶片安放角 θ_i 的实际功率, kW , 应小

于第 j 台水泵的电动机额定功率
 $N_{0,j}$

1.2 大系统分解-动态规划聚合求解方法

1.2.1 大系统分解

将各水泵机组日抽水量 W_j 设为协调变量, 则式(1)~(3)分解为 J_z 个子系统, 即单机组叶片全调节日运行优化模型。该模型以单机组日开机运行总耗电费用最小为目标函数, 各时段水泵开机的叶片安放角(为便于现场操作, 取整数角度)为决策变量, 规定时段内的抽水量 W_j 为约束条件。

目标函数

$$\min F_j = \sum_{i=1}^{S_N} \frac{\rho g Q_{i,j}(\theta_i) H_i}{\eta_{zi,j} \eta_{mot,j} \eta_{int,j}} \Delta T_i \Delta P_i \quad (j=1, 2, \dots, J_z) \quad (4)$$

总水量约束

$$\sum_{i=1}^{S_N} Q_{i,j}(\theta_i) \Delta T_i \geq W_j \quad (i=1, 2, \dots, S_N; j=1, 2, \dots, J_z) \quad (5)$$

功率约束

$$N_{i,j}(\theta_i) \leq N_{0,j} \quad (i=1, 2, \dots, S_N; j=1, 2, \dots, J_z) \quad (6)$$

式中 W_j ——第 j 台水泵机组日目标提水总量, m^3

1.2.2 子系统优化

式(4)~(6)为典型一维动态规划模型, 阶段变量 $i(i=1, 2, \dots, S_N)$; 决策变量为叶片安放角 (θ_i) , 由式(5)可知不同阶段的提水量即为状态变量 (λ) 。采用动态规划法求解该模型, 获得对应于目标配水量 W_j 的一系列对应的 F_j 值, 该模型的求解详见文献[6]。

对于1座安装 J_z 台不同型号水泵机组的泵站, 或同一型号各机组性能存在的差异, 则每台水泵均有各自的性能曲线, 因此在不同时段的时均扬程下均有一满足功率要求的最大流量对应的叶片角度。以一定步长离散各时段最大叶片角度下运行时的提水总量 $W_{j,\max}$, 采用单机组叶片全调节日优化运行模型分别计算各机组对应不同水量要求 $W_{j,m}$ 下的最小提水费用 $F_{j,m}(j=1, 2, \dots, J_z; m=1, 2, \dots, \max)$ 。

1.2.3 大系统动态规划聚合

由上述各子系统获得一系列 $W_{j,m} - F_{j,m}(W_{j,m})$ 关系。则模型(1)~(3)可转化为如下聚合模型:

目标函数

$$F = \min \sum_{j=1}^{J_z} F_j(W_j) \quad (7)$$

水量约束

$$\sum_{j=1}^{J_z} W_j \geq W_e \quad (8)$$

聚合模型式(7)~(8)同样为典型的一维动态规划模型, 阶段变量为 $j(j=1, 2, \dots, J_z)$; 决策变量为各机组日提水量 W_j , 其离散范围即为单机组优化时的目标水量离散范围 $W_{j,m}(m=1, 2, \dots, \max)$; 由式(8)可知泵站各机组提水总量的离散值即为状态变量 (λ) 。采用动态规划法求解该模型, 获得满足泵站目标提水总量 W_e 的 F 值, 以及对应于 F 的各机组最优提水量组合 $W_j^*(j=1, 2, \dots, J_z)$ 。该模型的求解方法参见文献[6]。

在获得各机组最优提水量组合 $W_j^*(j=1, 2, \dots, J_z)$ 后, 根据单机组优化结果回查可得到各水泵机组的最优开机方式, 即各机组各时段最优叶片安放角度 $\theta_{ij}^*(i=1, 2, \dots, S_N; j=1, 2, \dots, J_z)$ 。

2 应用实例

2.1 淮安四站基本情况

淮安四站属南水北调东线第二级泵站, 安装立式轴流泵4台(一台备机), 额定转速 $n=150 \text{ r/min}$, 叶轮直径为 $2\,900 \text{ mm}$, 单机流量 $33.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 配套电动机功率 $N_0=2\,500 \text{ kW}$ 。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 $(-4^\circ \sim +4^\circ)$ 。

淮安四站上、下游均为容积足够大的输水河道, 日均扬程变幅很小, 因此考虑日均扬程不变。泵站安装4台相同型号水泵机组(1台备用), 设计净扬程 4.18 m 。根据泵站设计最大净扬程 5.33 m , 最小净扬程 3.13 m , 以 0.2 m 步长离散成12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, 采用大系统分解-动态规划聚合方法, 分别计算各日均扬程不同水量约束下泵站最小提水费用对应的单位提水费用。

2.2 淮安四站站内多机组叶片全调节日优化运行模型优化结果

上述模型可得不同日均扬程 $(3.13 \sim 5.33 \text{ m})$ 、不同负荷 $(100\%、80\%、60\%)$ 、不同峰谷电价时淮安四站多机组组合优化运行方案(如日均扬程 $3.13、3.33 \text{ m}$, 80%负荷优化运行方案如表2所示); 不同负荷下优化运行的单位提水费用如图1所示, 较定角恒速运行单位提水费用的节约百分比如图2所示; 叶片全调节优化运行较定角恒速运行机组累计节省开机时间如图3所示。

2.3 淮安四站站内多机组叶片全调节日优化运行结果讨论

应用大系统分解-动态规划聚合法对各日均扬程不同提水负荷要求进行站内多机组叶片全调节优

表 2 考虑峰谷电价 80% 负荷各日均扬程下叶片全调节优化运行方案

Tab. 2 Optimal operation schemes of 80% load with adjustable-blade under each average daily head considering peak-valley electricity price (°)

日均扬程 /m	机组编号	时段编号								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
3.13	机组 1	停机	+1	+1	+3	+4	+1	+1	+1	+1
	机组 2	停机	停机	+1	+4	+4	停机	停机	+1	+1
	机组 3	停机	停机	+1	+3	+1	停机	停机	+1	+1
3.33	机组 1	停机	停机	+1	+4	+4	+1	+1	+1	+1
	机组 2	停机	停机	+1	+3	+3	停机	+1	+1	+1
	机组 3	停机	停机	+1	+2	+2	停机	停机	+1	+1

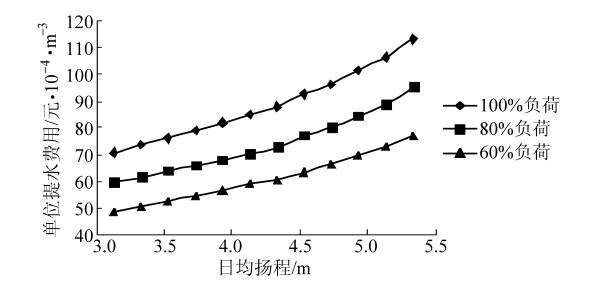


图 1 叶片全调节优化运行单位费用

Fig. 1 Unit cost of water pumping under the optimal operation with adjustable-blade

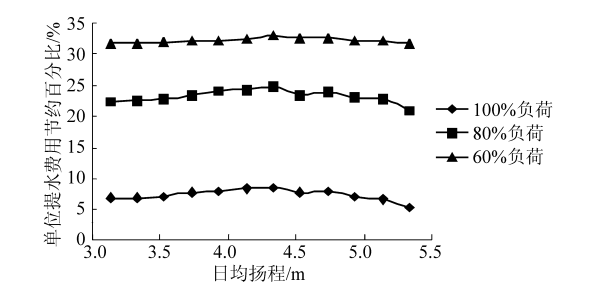


图 2 叶片全调节优化运行较定角恒速运行单位提水费用节省对比

Fig. 2 Cost saving comparison of optimal operations with adjustable-blade compared and with that of fixed blade angle and constant speed

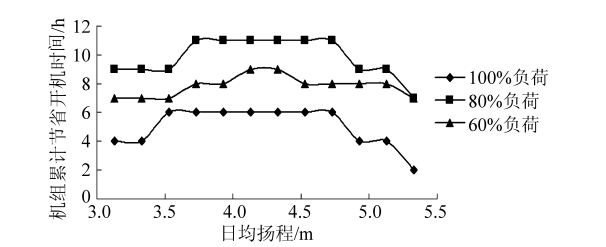


图 3 较定角恒速运行机组累计节省开机时间

Fig. 3 Total saving time length of pump units compared with operation with fixed blade angle and constant speed

化计算,对获得的图表进行分析,可以获得以下结果:

(1)满负荷、80% 负荷、60% 负荷下各日均扬程下淮安四站多机组叶片全调节优化运行平均单位提

水费用分别为 88.67、73.92、61.05 元/万 m³,较定角恒速运行单位费用分别节省 7.29%、23.19%、32.21%;与采用试验选优法求得的同一时段内相同叶片角度下运行的优化结果相比,平均节省幅度分别提高 0.62%、0.65%、0.22%。考虑泵站全年抽水量约 18 亿 m³,节省效果显著。可见,采用该方法对多机组进行优化求解使得泵站运行更为经济。

(2)优化结果表明,泵站运行时停机均在高电价时段;开机时基本上是高电价对应于小叶片角、少开机台数,低电价对应于大叶片角、多开机台数。且开机时尽量避免在负叶片角度下运行,转而寻求满足水量要求下增加停机时段以节省电费,即优先考虑开机台数的变化,进而对叶片角度进行调整。

(3)满负荷、80% 负荷、60% 负荷,各日均扬程下采用叶片全调节优化运行时机组 24 h 累计平均节省开机时间分别为 5.00、9.83、7.83 h;且同一负荷下,在低日均扬程段和高日均扬程段机组平均节省开机时间较中间日均扬程段小。

(4)由于大系统分解聚合法首先对单机组叶片全调节日优化运行数学模型进行动态规划,再通过聚合模型进行各机组间的水量总体协调,可以获得同一时段内各机组在不同叶片安放角度下的最优运行方式,因此,该方法同样适用于安装不同型号水泵机组或机组性能存在差异的泵站多机组叶片全调节日优化运行问题。

3 结束语

提出大系统分解-动态规划聚合方法用于求解大型泵站多机组叶片全调节日优化运行数学模型,取得了显著优化成果。该方法对如式(1)~(3)的复杂非线性模型的最优化问题具有参考意义;适用于解决安装不同型号水泵机组或同一型号水泵性能存在差异的泵站优化运行问题,即可以求解出水泵机组在同一时段内不同叶片角度下运行的优化结

果,从泵站经济运行角度而言,节能效益更为显著。该成果可为日均扬程变幅较小的大型泵站站内多机组叶片全调节优化运行提供参考,同时也为淮安站—淮阴站站间优化运行提供研究基础。

通过典型泵站的计算分析,建立了一套不同日均扬程及提水负荷要求下的泵站日运行优化调度预案。

参 考 文 献

1 李彬,李平夫. 泵站优化调度中考虑一次性开机约束的改进遗传算法[J]. 水利水电技术, 2006,37(8): 94~96.
Li Bin, Li Pingfu. Improved genetic algorithm for one-time start up constraint considered for optimal operation of pumping station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(8): 94~96. (in Chinese)

2 仇锦先,程吉林,张仁田,等. 江都站不同型号机组叶片全调节优化运行效果分析[J]. 南水北调与水利科技,2009, 7(6):85~89.
Qiu Jinxian, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Effect analysis of blade-adjusting optimization operation of different-type pumps in Jiangdu Pumping Station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6):85~89. (in Chinese)

3 竺慧珠,夏富洲. 大系统分解-聚合法在拱式渡槽整体结构优化中的应用[J]. 水利学报, 1995, 26(10): 1~7.
Zhu Huizhu, Xia Fuzhou. Application of decomposition-aggregation method of large-scale system on whole structural optimization of arch aqueduct [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(10): 1~7. (in Chinese)

4 周玉琴,王丽萍,张保生,等. 深圳市东部水库群联合供水调度模型探讨[J]. 水电能源科学, 2005, 23(2): 25~28.
Zhou Yuqin, Wang Liping, Zhang Baosheng, et al. Discussion on water supply operation model of east Shenzhen reservoir group [J]. Hydroelectric Energy, 2005, 23(2): 25~28. (in Chinese)

5 Shaaban Hassan, Grujic Ljubomir. Decomposition-aggregation method applied to a multimachine power system[J]. Large Scale Systems,1986, 10(2): 115~132.

6 程吉林,张礼华,张仁田,等. 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 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 499~504. (in Chinese)

7 王德智,董增川,丁胜祥. 供水库群的聚合分解协调模型[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2006, 34(6): 622~626.
Wang Dezhi, Dong Zengchuan, Ding Shengxiang. Research on aggregation-decomposition-coordination model of feeding reservoir group [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(6): 622~626. (in Chinese)

8 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.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Huang Haitian, et al. Research on operation optimization of Jiangdu Pump Station at the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 130~134. (in Chinese)

9 陈守伦,芮钧,徐青,等. 泵站日优化运行调度研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 82~83.
Chen Shoulun, Rui Jun, Xu Qing, et al. Daily optimal operation for pumping stations [J]. Hydroelectric Energy, 2003, 21(3): 82~83. (in Chinese)

10 计欣,俞国平. 基于峰谷电价的原水泵站运行调度策略[J]. 城镇供水, 2006(5): 28~29.
Ji Xin, Yu Guoping. Operation strategy of pump stations based on peak-valley electricity price [J]. City and Town Water Supply, 2006(5): 28~29. (in Chinese)

11 Cooper L, Mary W Cooper. Introduction to dynamic programming[M]. New York: Pergamon Press, 1981.

12 金菊良,丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都:四川科学技术出版社, 2002.

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.
Cheng Jilin,Zhang Lihua,Zhang Rentian, et al. Optimal 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)