

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.015

泵站单机组变速运行优化方法研究*

程吉林¹ 张礼华¹ 张仁田^{1,2} 龚懿¹ 朱红耕¹ 邓东升³

(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;

3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029)

【摘要】 考虑峰谷电价与站下水位变幅等因素,提出了以日开机运行总耗电费用最少为目标函数,各时段水泵转速为决策变量,规定时段内抽水总量为约束条件的单机组变速优化运行动态规划模型。对江都四站单机组变速优化运行与恒速运行进行了比较分析,结果表明:满负荷工作时,无论是否考虑峰谷电价,变速带来的效益不足以抵消安装变频装置产生的耗损;考虑峰谷电价、非满负荷工作时,效益明显;不考虑峰谷电价情况下,80%和60%负荷工作时,变速节省的电费偿还相应配套功率的变频装置投资约需15~18年和7~10年。

关键词: 泵站 单机组 变频变速 优化

中图分类号: TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0072-05

Optimal Methodology of Single-unit Variable Speed Operation in Pumping Station

Cheng Jilin¹ Zhang Lihua¹ Zhang Rentian^{1,2} Gong Yi¹ Zhu Honggeng¹ Deng Dongsheng³

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. Jiangsu Surveying & Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China

3. Jiangsu Water Supply Co., Ltd. for S-to-N Water Diversion Project, Nanjing 210029, China)

Abstract

A dynamic planning model for single-unit pump variable speed optimal operation was developed in which peak-valley electricity prices and variable water levels in down-stream were considered. In this model, the minimum electricity consumption cost in one-day operation was the objective function. The speed of pump was a decision variable and specified pumping water volume was the constraint. A comparison between optimized variable speed and fixed speed operations of a single-unit in Jiangdu No. 4 Pumping Station was made. The results show that within the head amplitude and with full-load operation, regardless of considering peak-valley electricity prices, the benefits of variable speed operation was not enough to compensate for energy losses of the VFD and considering the peak-valley electricity prices and part-load operation, the benefit was excellent while without considering peak-valley electricity prices and single-unit operates at 80% and 60% loads, the saving 15 to 18 years and 7 to 10 years can compensate respectively for the VFD investments.

Key words Pumping station, Single-unit pump, Variable speed operation with VFD, Optimization

引言

目前,我国泵站变速优化运行在城市水厂运行

中较为多见^[1-2],随着近年来国外变频设备的不断引进,以及在南水北调大型泵站中的安装应用,大型泵站(群)的变频变速优化运行也更多地引起人们

收稿日期:2009-01-12 修回日期:2009-03-30

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A03)、国家自然科学基金资助项目(60974099)、江苏省高校自然科学基金资助项目(09KJA570001)和教育部博士点基金资助项目(20093250110002)

作者简介:程吉林,教授,主要从事水利规划优化理论与应用研究,E-mail:jlcheng@yzu.edu.cn

的关注^[3-5]。本文在国内外已有泵站优化运行的基础上^[6-8],开展单机组变速优化运行分析研究,旨在分析不同水位变幅情况下的大型泵站单机组变速优化运行规律,为泵站站间乃至南水北调工程泵站群优化运行,大型泵机组改造提供参考依据。

1 单机组变速日运行优化模型的建立与求解

1.1 模型建立

以日开机运行总耗电费用最低为目标函数,在设计叶片安装角情况下,各时段水泵转速为决策变量,规定时段内的抽水总量为约束条件,建立单机组变速优化日运行数学模型,其中1日24h考虑峰谷电价与潮位涨落情况划分为 SN 时段。则

目标函数

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

总水量约束

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

功率约束

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

式中, f 、 f_i 分别表示1d、第 i 时段的运行电费,万元; $Q_i(n_i)$ 为在第 i 时段水泵流量,当扬程、叶片安放角一定时,为机组转速(n_i)的函数,其中, $Q_i(n_i) = 0$ 表示该阶段不开机; SN 为1d分割的运行时段,根据峰谷电价划分; H_i 为第 i 时段的时均扬程,m; ΔT_i 为第 i 时段划分的时间长,h; P_i 为第 i 时段的分时电价; W_e 为下达的日提水总量; η_{zi} 、 η_{mot} 、 η_{int} 、 η_f 分别指装置效率、电动机效率、传动效率和变频效率, η_{zi} 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 η_{mot} 基本不变,大型电动机的 η_{mot} 值在94%左右;直联机组的传动效率 η_{int} 为1;大功率PWM高压变频器的变频效率 η_f 在96%左右; $N_i(n_i)$ 为 i 阶段对应转速 n_i 的实际功率,应小于电动机额定功率 N_0 。

1.2 动态规划方法求解变速优化运行模型

上述模型为一维动态规划模型,阶段变量为 $i(i=1, 2, \dots, SN)$;决策变量为机组转速 n_i ,由式(2)可知不同阶段的提水量即状态变量为 λ 。参照文献^[9-11],可得对应状态转移方程与递推方程。

在整个计算过程中,将电动机效率和变频器效率分别按94%和96%常数考虑。

2 江都四站单机组变速日运行优化分析

江都四站安装7台轴流泵,额定转速为 $n = 150$ r/min,设计叶片安装角 $\theta = 0^\circ$ 。以该站单机组

在不同负荷工作、单机组日不同提水总水量为约束条件,进行单机组变速日运行优化分析。

2.1 相关变量与参数确定

(1) 峰谷电价与阶段划分

峰谷电价:根据2008年7月江苏省物价局公布的峰谷分时销售电价:峰(7~11时,17~21时)对应电价0.978元/(kW·h);非峰谷(11~17时,21~23时),对应电价0.587元/(kW·h),谷(23~7时)对应电价0.276元/(kW·h),未实行分时电价的电价为0.783元/(kW·h)。

考虑分时电价和大型泵站不宜频繁开停机的要求,将全天分为9个时段,如表1所示。

表1 各时段电价

Tab.1 Electricity price of each time period

		元/(kW·h)	
时段	电价	时段	电价
I (17:00 ~ 19:00)	0.978	VI (07:00 ~ 09:00)	0.978
II (19:00 ~ 21:00)	0.978	VII (09:00 ~ 11:00)	0.978
III (21:00 ~ 23:00)	0.587	VIII (11:00 ~ 14:00)	0.587
IV (23:00 ~ 03:00)	0.276	IX (14:00 ~ 17:00)	0.587
V (03:00 ~ 07:00)	0.276		

(2) 不同转速下流量、效率的计算

在一定的转速变化范围内水泵的流量、扬程和功率符合比例率,而且相似工况点效率不变^[12-14]。因此,在叶片安放角不变的条件下,根据额定转速 n_e 时的流量 $Q_e(n_e)$ 和装置扬程 $H_e(n_e)$,可得到不同转速 n_i 下装置扬程 $H_i(n_i)$ 时的流量 $Q_i(n_i)$ 和对应装置效率 $\eta_{zi}(n_i)$,即

$$\begin{cases} \frac{Q_i(n_i)}{Q_e(n_e)} = \frac{n_i}{n_e} \\ \frac{H_i(n_i)}{H_e(n_e)} = \left(\frac{n_i}{n_e}\right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

由江都四站水泵模型装置性能试验,在叶片安放角为 0° ,额定转速 $n_e = 150$ r/min时的对应装置扬程-流量和效率-扬程关系为

$$H = -0.0183Q^2 + 0.9596Q - 3.6323 \quad (R^2 = 0.999) \quad (5)$$

$$\eta_z = -0.0037Q^3 + 0.103Q^2 + 6.833Q - 128.23 \quad (R^2 = 0.999) \quad (6)$$

由式(4)~(6),可得任意转速下的扬程-流量及装置效率-流量关系。图1为江都四站单机组在 $n_e = 150$ 、 $n_1 = 145$ r/min时的 $Q-H$ 、 $Q-\eta_z$ 曲线。

(3) 决策变量与状态变量离散

在一定转速范围内,决策变量离散为: $n_i = 125, 130, \dots, 152, 155$ r/min。

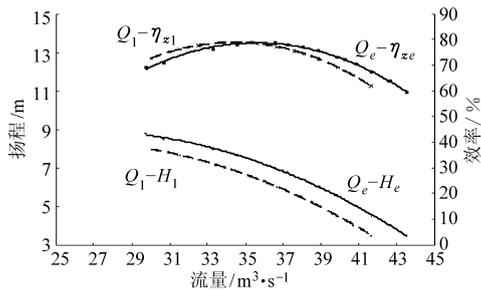


图1 $n_e = 150 \text{ r/min}$ 和 $n_1 = 145 \text{ r/min}$ 时的
 $Q-H$ 、 $Q-\eta_z$ 关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between flow rate, head and efficiency with speeds 150, 145 r/min

状态变量 λ 按照等步长进行离散,离散为 0, 0.2×10^6 , 0.4×10^6 , ..., $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

(4) 有关说明

日均扬程与潮位过程:典型潮位过程指枯水月份 12 月、1 月、2 月长江三江营站平均高潮 1.48 m、平均低潮 0.28 m, 平均潮位 0.88 m, 平均潮差 1.2 m, 平均涨潮历时 3 h 37 min, 落潮历时 8 h 49 min, 总计 24 h 52 min。此时的日均扬程对应为 7.8 m, 即:站下平均设计水位 0.7 m, 站上设计水位 8.5 m (且保持不变)。在江都站不同年型 (丰、平、枯)、不同月份可能发生的日均扬程为 3.8、4.8、5.8、6.8、7.8 m; 在不同年型、不同月份的潮型 (涨落潮时间) 基本保持不变, 潮差略有变化, 但变幅不大。在模型分析中, 为了计算分析方便, 对潮型进行概化, 计算分析的各种工况潮差均以 1.2 m 计。

恒速运行方式与满负荷、80% 负荷、60% 负荷工作:如额定转速 150 r/min, 叶片安放角 0° 时, 连续运行 24 h 时, 即为恒速运行方式; 此时, 日均扬程 7.8 m 对应的提水总量为 $2.95 \times 10^6 \text{ m}^3$, 当式 (2) 中要求 $W_e \geq 2.95 \times 10^6 \text{ m}^3$, 即为对应日均扬程的泵站单机组满负荷工作。80%、60% 负荷工作, 即要求泵站机组提水总量 (式 (2) 中的 W_e) 为对应扬程连续运行 24 h 提水总量的 80%、60%。

开机时刻与潮位、峰谷电价组合:开机时刻与峰谷电价组合如表 1 所示, 为讨论方便, 开机时刻设为 17 点, 该时刻为满负荷工作时的最优开机时刻, 即对应的潮位、峰谷电价组合时, 在依次的 1 d (分 24 种开机时刻, 对应 1 h 一种) 开机时刻中, 该时刻开机费用最小, 该成果将在另文中介绍。

由于变速运行优化模型中式 (2) 采用非等式约束, 因此, 为了便于变速运行与恒速运行之间的比较, 最后采用单位水量的提水电费最小作为选优依据。

2.2 模型求解与分析

2.2.1 考虑峰谷电价模型分析结果

考虑峰谷电价时, 按泵站单机组不同负荷工作

方式与对应日均扬程、典型潮位过程下的优化计算结果如下:

(1) 满负荷工作、不同日均扬程、典型潮位过程时的优化计算结果

满负荷工作, 日均扬程 (7.8 m)、典型潮位过程时, 由动态规则递推方法^[10-11] 获对应单机组变速优化运行结果。在满负荷工作时, 即要求提水量大于 $2.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的情况下, 采取变速优化运行, 其日单位提水费用为 183.3 元/万 m^3 ; 而对应恒速运行的单位提水费用为 176.5 元/万 m^3 , 可见变速运行单位提水费用反而增加了 3.79%。此时, 变速带来的效益不足以抵消变频装置的耗损。

日均扬程 6.8、5.8、4.8 和 3.8 m 时, 变速运行与恒速运行相比提水费用节省了 -1.38%、-0.14%、-0.2%、-0.33%, 同样变速带来的效益不足以抵消变频装置的耗损。

(2) 不同负荷工作、不同日均扬程、典型潮位过程时的优化计算结果

南水北调东线工程有洪泽湖、骆马湖等调节水库, 江都站具备不同负荷工作条件。当江都站 80% 负荷工作时, 不同扬程变速运行与恒速运行相比, 单位提水费用节省 8.99% ~ 17.29%, 平均 14.01%; 60% 负荷工作时, 单位提水费用节省 21.04% ~ 30.96%, 平均 26.69%。

考虑峰谷电价时, 不同负荷、不同日均扬程的变速运行与恒速运行单位提水费用节省情况如图 2 所示。日均扬程 7.8 m、80% 负荷工作时, 变速优化运行过程如图 3a 所示, 可见变速运行时, 不开机的均在高电价时段; 开机时高电价对应于降速、低电价对应于升速运行。

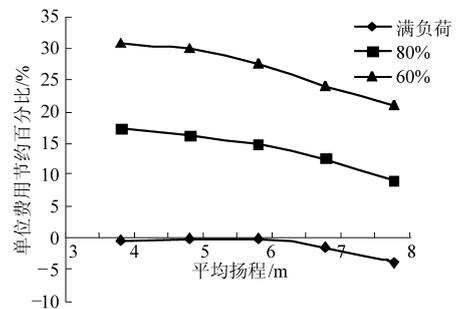


图2 考虑峰谷电价时, 不同负荷情况下变速与恒速运行相比的优化结果

Fig. 2 Optimal results of comparison between variable speed and constant speed under the different loads with peak-valley electricity prices

2.2.2 不考虑峰谷电价的分析结果

为进一步区别上述优化结果中, 变频运行与峰谷电价所带来的效益, 本文将式 (1) ~ (3) 中不

同时段的电价全部采用非峰谷电价,即0.783元/(kW·h),代入模型。得到不考虑峰谷电价时,不同负荷、不同日均扬程情况下,变速运行与恒速运行的单位费用计算结果,如图4所示。日均扬程4.8m、80%负荷工作时,变速优化运行过程如图3b所示。

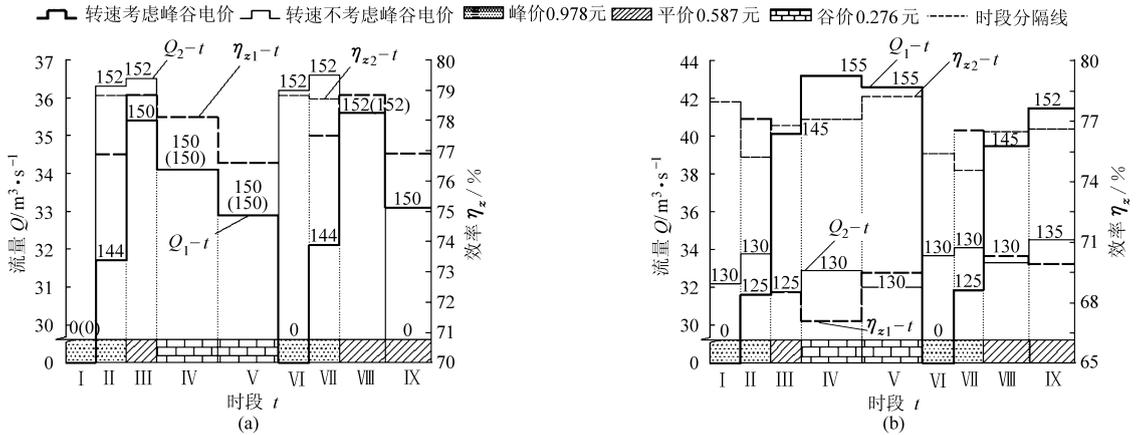


图3 80%负荷工作时的变速优化运行过程

Fig. 3 Results of operation optimization in the variable-speed state at the load of 80%

(a) 平均扬程7.8m (b) 平均扬程4.8m

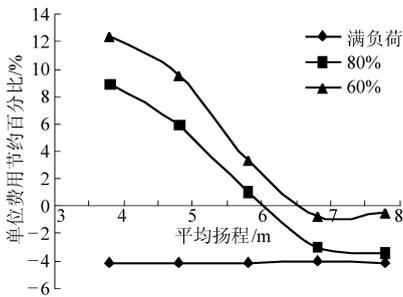


图4 不考虑峰谷电价时,不同负荷情况下变速与恒速运行相比的优化结果

Fig. 4 Optimal results of comparison between variable speed and constant speed under the different loads without peak-valley electricity prices

(2) 不同负荷工作时的优化计算结果

80%负荷工作时,日均扬程7.8、6.8、5.8、4.8和3.8m时,变速运行与恒速运行相比提水费用节省了-3.36%、-3.02%、1.07%、5.96%、8.97%;60%负荷工作时,对应扬程提水费用节省依次为-0.49%、-0.67%、3.30%、9.53%、12.39%。可见当泵站机组低负荷、低扬程运行时,变频变速效益才能得以充分发挥。

3 结论

(1) 江都站扬程受长江水位影响变幅较大,一年中日均扬程的变化范围大多在3.8~7.8m之间,一天的潮差变化1.2m左右,在此扬程变幅范围内,满负荷工作时,无论是否考虑峰谷电价,变速带来的

(1) 满负荷工作时的优化计算结果

不考虑峰谷电价、满负荷工作情况下,日均扬程7.8、6.8、5.8、4.8和3.8m时,变速运行与恒速运行相比提水费用增加了4.14%、4.05%、4.16%、4.16%、4.08%,平均4.12%,变速带来的效益不足以抵消变频装置的耗损。

效益不足以抵消变频装置的耗损。

(2) 考虑峰谷电价情况下,变速运行时不开机均在高电价时段,且高电价对应于低转速、低电价则为高转速。江都站单机组80%负荷工作时,不同扬程变速运行与恒速运行相比,单位提水费用平均节省14.01%;60%负荷工作时26.69%。考虑到变频装置现行价格(与江都四站同步电动机配套的高压变频装置每条约200~250万元),以年运行5000h中的二分之一时间采用非满负荷运行,则仅需2~3年变频变速运行节省的电费就能偿还相应配套功率的变频装置投资。

(3) 不考虑峰谷电价情况下,80%负荷工作时,扬程6.0m以下时,变速才能节省单位提水能耗;考虑到变频装置现行价格,以江都站年运行5000h中的二分之一时间在6.0m以下、且二分之一时间为非满负荷运行考虑,则变速运行15~18年节省的电费才能偿还相应配套功率的变频装置投资。60%负荷工作时,扬程小于6.5m,变速运行均能节省单位提水能耗,且低扬程运行时,效益更为显著;此时,变速运行7~10年节省的电费才能偿还变频装置的投资。考虑到变频装置的使用寿命,仅从经济可行性而言,在不考虑峰谷电价、现行变频装置价格情况下,江都四站的改造中可考虑不安装变频设备。

(4) 本文针对江都四站单机组优化运行取得的成果前提是:泵机组在运行过程中,水泵叶片保持设计安放角(0°)不变。

(5) 单机组变速优化运行数学模型及求解,是泵站多机组优化运行的前提之一,该方法可为泵站站间乃至南水北调工程梯级泵站群的优化运行、大型泵站改造提供参考。

参 考 文 献

- 1 董益林,刘光临,徐叶琴. 大型双速全调节轴流泵及其应用[J]. 水利学报,1995,26(5):18~24.
Dong Yilin, Liu Guanglin, Xu Yeqin. Adjustable axial-flow pump with double speed and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(5): 18~24. (in Chinese)
- 2 李虹,孙松. 施行峰谷电价后调速水泵供水费用探讨[J]. 中国给水排水,1999,15(4):35~36.
Li Hong, Sun Song. Study on water supply cost of variable speed pump under peak-valley electricity price [J]. China Water and Wastewater, 1999, 15(4): 35~36. (in Chinese)
- 3 胡彦明. 利用电网的峰谷电价实现泵站经济运行[J]. 水电厂自动化,2004(2):97~100.
Hu Yanming. Realization of pump's economic operation by utilizing peak-valley electricity price of electric power network [J]. Hydropower Plant Automation, 2004(2): 97~100. (in Chinese)
- 4 冯晓莉,仇宝云,黄海田. 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. 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)
- 5 张德虎,吕冬明,孙尔军. 大型泵站变频调速运行技术及节能分析[J]. 能源研究与利用,2001(6):33~34.
Zhang Dehu, Lü Dongming, Sun Erjun. Operation technology and energy saving analysis on frequency control of large scale pump station [J]. Energy Research and Utilization, 2001(6): 33~34. (in Chinese)
- 6 Sabet M H, Coe J Q. Models for water and power scheduling for the California state water project [J]. Water Resources Bulletin, 1986, 22(4): 587~596.
- 7 Barnes Jr G W, Chung F I. Operational planning for California water system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1986, 112(1): 71~86.
- 8 李继珊. 多级泵站优化调度及经济运行研究[J]. 水利学报,1992,12(12):18~20.
Li Jishan. Study on optimal and economic operation of multi-grade pump station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 12(12): 18~20. (in Chinese)
- 9 Cooper I, Cooper Mary W. Introduction to dynamic programming [M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- 10 程吉林,郭元裕,金兆森,等. 大系统数学规划试验优选方法及应用[J]. 中国科学:E辑,1998,28(3):105~108.
Cheng Jilin, Guo Yuanyu, Jin Zhaosen, et al. Theory and application of a mathematical programming and optimal experimental method for large-scale systems [J]. Science in China: Series E, 1998, 28(3): 105~108. (in Chinese)
- 11 程吉林. 大系统试验优选理论与应用 [M]. 上海:上海科技出版社,2002.
- 12 袁春元. 混流泵叶轮流场计算与性能试验[J]. 农业机械学报,2008,39(3):52~55.
Yuan Chunyuan. Numerical calculation of turbulent flow and performance experiment of mixed flow pump impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 52~55. (in Chinese)
- 13 刘超,严登丰,卢心虹,等. 水泵变速运行研究[J]. 水泵技术,1987(3):54~59.
Liu Chao, Yan Dengfeng, Lu Xinhong, et al. Research on operation of pumps with variable speed [J]. Pump Technology, 1987(3): 54~59. (in Chinese)
- 14 储训. 混流泵变速特性试验研究[J]. 水泵技术,1989(4):54~59.
Chu Xun. Study on characteristics of variable speed in mixed-flow pumps [J]. Pump Technology, 1989(4): 54~59. (in Chinese)

(上接第66页)

- 12 任静,常近时. 混流式水轮机转轮内三元空化流场的预测[J]. 水利学报,1998,29(7):8~11.
Ren Jing, Chang Jinshi. Analysis of 3-D cavity flow field in the runner of mixed-flow hydraulic turbine [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(7): 8~11. (in Chinese)
- 13 Yakhot V, Orszag S A, Tangham S, et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Phys. Fluids, 1992, 4(7): 1510~1520.
- 14 Watanabe T. Development of a marine propeller simulator considering wake and cavitation [D]. Tokyo: University of Tokyo, 2004.