

# 井群泵站经济运行方案研究

李开来, 朱满林, 李小周, 邢孟, 惠治国  
(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 井群泵站运行方案的选择直接影响泵站运行费用。建立井群泵站水泵并联运行的非线性能量方程组, 通过牛顿迭代法求解并联运行水泵工况点结合两部制电价计算出各运行方案对应的单方水耗电费用。以井群泵站日运行耗电费用最小为目标函数, 建立了优化运行方案的线性规划模型。结果表明: 优化运行方案中单方水耗电费用低的方案所分配的运行时间长, 符合预期; 设计供水规模下优化方案比原方案节约日耗电费用 5.14%。对类似工程实现高效经济运行具有参考意义。

**关键词:** 井群泵站; 运行优化; 并联运行; 线性规划法

中图分类号: TV675 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)06-0173-04

## Study on the scheme of economic operation of well group pumping stations

LI Kailai, ZHU Manlin, LI Xiaozhou, XING Meng, HUI Zhiguo  
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The selection of operation plan of well group pumping station will directly affect the operation cost of pumping station. The nonlinear energy equations of parallel operation of pump in group pumping station are established. The Newton iteration method is used to solve the parallel pump operating point, and the two unit power price is used to calculate the corresponding water consumption and electricity bill. The linear programming model of optimal operation scheme is established by taking the minimum power consumption of the pumping station as the objective function. The results show that the running time of the single water consumption and low electricity tariff scheme in the optimized operation scheme is long and conforms to the expectation; the optimal scheme under the design of water supply scale saves 5.14% of the daily electricity consumption compared with the original scheme. It has guiding significance for similar projects to achieve efficient and economical operation.

**Key words:** well group pumping station; operation optimization; parallel operation; linear programming theory

## 1 研究背景

井群泵站经济运行方案优化就是在满足需水量的情况下, 合理地确定水泵的运行方式、开机台数, 以达到运行能耗少、运行费用低的目的。

目前, 国内外学者针对单级泵站<sup>[1-8]</sup>、梯级泵站<sup>[9-11]</sup>、并联泵站群<sup>[12-13]</sup>, 构建了不同类型优化运行模型, 采取适宜的优化算法求解并取得了丰富的成果。但也存在一些问题, 例如泵站输水系统经济运行研究对梯级泵站、单级泵站研究较多, 对并联泵

站群, 尤其是井群泵站研究很少; 计费方式上常选择峰谷分时电价建立运行费用最小优化模型, 虽然削峰填谷对电费进行了优化, 但也造成用电设备利用率降低, 这对机组众多、变压器容量大的井群泵站影响较大; 在优化算法的选择上, 动态规划法虽然计算精度高, 但是存在收敛不稳定和计算时间长的问题; 用遗传算法进行优化, 虽提升了计算速度快, 但有容易陷入局部极值的缺陷。针对上述问题, 笔者通过牛顿迭代法求解并联运行水泵工况点, 基于工程所在地两部制电价规则, 应用穷举法结合 Matlab 软件

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479160)

作者简介: 李开来(1992-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 研究方向为供水工程理论与技术。

通讯作者: 朱满林(1960-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为供水工程理论与技术。

编程求解该工程所有开机组合提升  $1 \text{ m}^3$  水至高位水池的耗电费。以井群泵站日运行耗电费最小为目标,建立优化运行方案的线性规划模型结合 Matlab 软件中的 linprog 函数编程求解,实现井群泵站的经济运行。

## 2 工程概况

某井群泵站布置 5 口渗流井,采用潜水泵从井内抽水,每口井安装 3 台潜水泵,共安装 15 台泵(其中 12 台工作,3 台备用)并联运行将水提升至高位水池,如图 1 所示。单井设计日取水量  $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,单井设计取水流量为  $0.139 \text{ m}^3/\text{s}$ ;4 口渗流井设计日总取水量  $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。潜水泵额定参数为流量  $0.048 \text{ m}^3/\text{s}$ ,扬程  $196.5 \text{ m}$ ,转速  $2900 \text{ r}/\text{min}$ ,配套电机输入功率  $163 \text{ kW}$ 。每口井内 3 台潜水泵共用一台变压器,变压器容量为  $630 \text{ kVA}$ 。工程所在地的电度电价为  $0.4693 \text{ 元}/\text{kWh}$ ,月基本电价为  $24 \text{ 元}/\text{kVA}$ 。

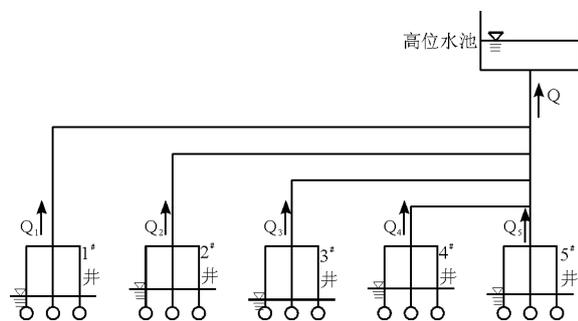


图1 某井群泵站供水工程示意图

## 3 数学模型建立

### 3.1 水泵性能曲线方程的拟合

采用数值计算方法求解并联泵组的工况点。为便于数值计算,需要有水泵性能曲线的函数关系式,一般采用差值或拟合的方法<sup>[14]</sup>。某井群泵站第  $i$  个泵组由  $j$  台水泵并联( $i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3$ ),对第  $j$  台水泵的性能曲线进行多项式拟合,可表示为:

$$\begin{cases} H_{i,j} = A_1 \cdot Q_{i,j}^2 + A_2 \cdot Q_{i,j} + A_3 \\ N_{i,j} = B_1 \cdot Q_{i,j}^2 + B_2 \cdot Q_{i,j} + B_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$  为水泵性能参数,可通过实验数据经多项式拟合得到; $Q_{i,j}$  为  $i$  号井  $j$  台泵工作流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_{i,j}$  为  $i$  号井  $j$  台泵工作扬程,  $\text{m}$ ;  $N_{i,j}$  为  $i$  号井  $j$  台泵轴功率,  $\text{kW}$ 。

### 3.2 水泵工况点的求解

根据连续性方程得:

$$Q = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Q_{i,j} \quad (2)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^3 Q_{i,j} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

式中: $Q$  为主干管流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_i$  为各井后干管流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

水泵并联运行的非线性能量方程可表示为:

$$\begin{aligned} F_{i,j} &= A_1 \cdot Q_{i,j}^2 + A_2 \cdot Q_{i,j} + A_3 - H_i - \frac{\sum_{j=1}^3 Q_{i,j}}{q_i} - \\ S_{ij} \cdot Q_{i,j}^2 - S_i \left( \sum_{j=1}^3 Q_{i,j} \right)^2 - S \left( \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Q_{i,j} \right)^2 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $H_i$  为各井静扬程,  $\text{m}$ ;  $q_i$  为各井单位出水量,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;  $S_{ij}$  为各井中出水管阻力参数,  $\text{s}^2/\text{m}^5$ ;  $S_i$  为各井后干管阻力参数,  $\text{s}^2/\text{m}^5$ ;  $S$  为主干管阻力参数,  $\text{s}^2/\text{m}^5$ 。

对(4)式求微分,可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} &= 2A_1 \cdot Q_{i,j} + A_2 - \frac{1}{q_i} - 2S_{i,j} \cdot Q_{i,j} - \\ &2S_i \sum_{j=1}^3 Q_{i,j} - 2S \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Q_{i,j} \end{aligned} \quad (5)$$

由牛顿迭代法<sup>[15]</sup>可知:

$$F_{i,j} + \frac{\partial F_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} \Delta Q_{i,j} = 0 \quad (6)$$

$$\Delta Q_{i,j} = \frac{-F_{i,j}}{\partial F_{i,j} / \partial Q_{i,j}} \quad (7)$$

求解时可预先设定初始值  $Q_{i,j}^{(0)}$ ,可求得校正流量为  $\Delta Q_{i,j}^{(0)}$ ,则各泵第一次校正后的流量为:

$$Q_{i,j}^{(1)} = Q_{i,j}^{(0)} + \Delta Q_{i,j}^{(0)} \quad (8)$$

重复上述计算,其通式:

$$Q_{i,j}^{(k+1)} = Q_{i,j}^{(k)} + \Delta Q_{i,j}^{(k)} \quad (9)$$

利用上述方法逐次迭代,直到满足计算精度为止,即:

$$|\Delta Q_{i,j}| \leq \varepsilon \quad (\varepsilon \text{ 取 } 1 \times 10^{-5}) \quad (10)$$

求得各台水泵运行工作点的流量  $Q_{i,j}$  后,将  $Q_{i,j}$  代入(1)式可分别求得各机组的实际工作扬程、轴功率。

### 3.3 单方水耗电费的计算

列式计算各运行方案提升  $1 \text{ m}^3$  水至高位水池产生的耗电费用<sup>[16]</sup>,即单方水耗电费。如下式:

$$W_i = \frac{t \cdot w_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_{i,j} + 12B_i \cdot w_2}{3600 t \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{i,j}} \quad (11)$$

式中: $W_i$  为泵站单方水耗电费,  $\text{元}/\text{m}^3$ ;  $t$  为泵站年

运行小时数,  $h$ ;  $w_1$  为电度电价, 元/kWh;  $N_{i,j}$  为第  $i$  号井第  $j$  台水泵机组轴功率, kW;  $Q_{i,j}$  为第  $i$  号井第  $j$  台水泵机组流量,  $m^3/s$ ;  $w_2$  为月基本电价, 元/kVA;  $B_i$  为第  $i$  号井变压器容量, kVA。

### 3.4 井群泵站运行方案优化模型

在工程运行过程中要不断的根据实际需水量情况调整井群泵站的运行方案, 确保节能节费。

需水量一定的情况下, 合理确定开机台数, 通过机组间流量的优化分配, 使泵站耗能最小。这一问题的实质是一个流量负荷在泵站机组间分配的空间最优化问题。经计算该井群泵站运行方案有 1 002 种, 即  $i = 1, 2, 3, \dots, 1\ 002$ 。以运行时间  $T_i$  为决策变量, 这一日运行耗电费最小的运行方案组合可用线性规划数学模型确定。目标函数和约束条件为:

$$\min P = \sum_{i=1}^n W_i Q_i T_i \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n Q_i T_i &= V \\ \sum_{i=1}^n T_i &= 24 \\ 0 \leq T_i &\leq 24 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:  $P$  为井群泵站日运行耗电费, 元;  $W_i$  为井群泵站不同运行方案的单方水耗电费, 元/ $m^3$ ;  $Q_i$  为不同运行方案的流量,  $m^3/h$ ;  $T_i$  为不同运行方案的运行时长,  $h$ ;  $V$  为日总需水量,  $m^3$ 。

线性规划问题可利用 Matlab 软件中的 linprog 函数求解, Matlab 规定线性规划问题的标准形式为:

$$\min c^T x \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (15)$$

求解线性规划问题的命令为:  $[x] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, Beq, lb, ub)$ , 其中:  $x$  为决策变量的返回值;  $f$  为目标函数系数构成的向量;  $A, b$  对应线性不等式约束, 若无则输入空向量  $[]$ ;  $Aeq, Beq$  对应线性等式约束, 若无则输入空向量  $[]$ ;  $lb, ub$  分别对应决策

变量的下界和上界。

综上, 此井群泵站工程日运行耗电费优化线性规划模型可利用 Matlab 软件的 linprog 函数求解, 具体命令为:  $[x] = \text{linprog}(f, [], [], Aeq, Beq, lb, ub)$ , 其中:  $f = [W_i \cdot Q_i]^T$ ;  $Aeq = [1_i; Q_i]$ ;  $Beq = [24; V]$ ;  $lb = [0_i]$ ;  $ub = [24_i]$ 。在执行命令前, 输入日用水量  $V$ , 执行程序即可计算出在此日用水量下, 使得日运行耗电费最小的运行方案。

## 4 计算结果分析

编程计算得到井群泵站不同开机组合下流量与相应提升  $1\ m^3$  水至高位水池消耗电费的关系, 如图 2 所示, 图中横坐标表示流量, 纵坐标表示不同开机组合提升  $1\ m^3$  水至高位水池产生的的电费。

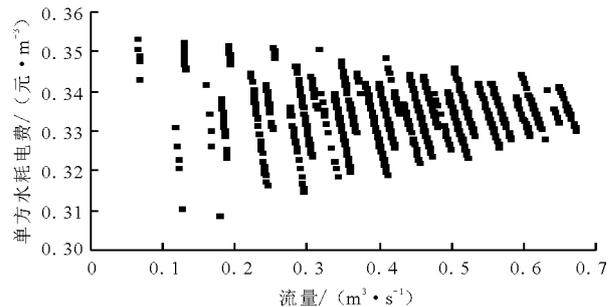


图 2 流量与单方水耗电费的关系

由图 2 可知, 在运行流量相等的情况下, 井群泵站不同的运行方案产生的单方水耗电费差距较大, 随着流量增大, 同一流量对应的单方水耗电费最大值递减、最小值递增。在井群泵站运行流量范围内, 确定一运行流量后, 都有一个使单方水耗电费最小的运行方案。

表 1 为运行流量相等时, 两种运行方案对应的单方水耗电费。可知流量相等而运行方案不同引起的单方水耗电费差距较大。以井群泵站建成后  $4.4 \times 10^4\ m^3/d$  的供水规模作参考, 在运行时间为 1 年的情况下, 采用方案 1 产生的耗电费用比方案 2 节省了 178 525 元, 可见选取适当的运行方案对节约电费作用斐然。

表 1 相同流量、不同运行方案的单方水耗电费

编号	运行方案	流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	单方水耗电费/ $(元 \cdot m^{-3})$
方案 1	1#井开 1 台, 2#井开 2 台, 4#、5#井各开 3 台	0.510	0.3285
方案 2	1#、3#井各开 2 台, 3#井开 3 台, 4#、5#井各开 1 台	0.510	0.3396

应用线性规划法结合 Matlab 软件编程计算得到表 2, 为井群泵站在相应的日用水量下使日运行耗电费最小的方案, 通过分析可知不同日用水量对应的井

群泵站最优运行方案是不同的, 实际运行中应根据具体日用水量来确定最优运行方案。表 3 对  $4.4 \times 10^4\ m^3$  设计供水规模下, 未优化运行方案和优化运行方

案的数据进行了对比,结果表明:采用优化运行方案的日运行耗电费比未优化运行方案节约5.14%。

表2 不同日用水量情况下井群泵站最优运行方案

日用水量/m <sup>3</sup>	经济运行方案
1 × 10 <sup>4</sup>	5 <sup>#</sup> 井开1台运行2.941 h后,5 <sup>#</sup> 井开2台运行21.059 h
2 × 10 <sup>4</sup>	5 <sup>#</sup> 井开3台运行12.538 h后,4 <sup>#</sup> 井开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行11.462 h
3 × 10 <sup>4</sup>	4 <sup>#</sup> 井开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行12.660 h后,1 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 井各开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行11.340 h
4 × 10 <sup>4</sup>	1 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 井各开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行12.185 h后,1 <sup>#</sup> 、3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 井各开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行11.815 h
4.4 × 10 <sup>4</sup>	1 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 井各开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行2.241 h后,1 <sup>#</sup> 、3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 井各开2台、5 <sup>#</sup> 井开3台运行21.759 h

表3 日用水量4.4 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 优化运行结果对比

方案	时段	流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	运行时间/h	供水量/m <sup>3</sup>	单方水耗电费/(元 · m <sup>-3</sup> )	日耗电费/元	节约百分比/%
未优化	I	0.5100	24.000	44064.00	0.3396	14964.13	
优化	I	0.4080	2.241	3291.58	0.3187	14195.62	5.14
	II	0.5196	21.759	40701.52	0.3230		

## 5 结 论

本文在保证安全可靠地供给用户所需流量的条件下,以使井群泵站日运行耗电费最小为目标,对井群泵站各运行井泵站对应的单台泵运行时间、供水流量进行最优分配。建立了井群泵站经济运行的线性规划模型,并附有算例和解法,可供井群泵站经济运行参考。得到以下结论:

(1)在运行流量相等的条件下,不同运行方案的单方水耗电费差距较大。

(2)随着流量增大,同一流量对应的单方水耗电费最大值递减、最小值递增。

(3)在设计供水规模下,优化方案的日运行耗电费比未优化方案节约5.14%。按两部制电价计费,虽能刺激用电部门提高用电设备利用率,但相比峰谷分时电价不利于用户合理转移用电负荷。因此根据工程实际选择适宜的计价制度和优化算法是未来的研究方向。

### 参考文献:

- [1] Zhuan Xiangtao, Li Wei, Yang Fei. Optimal operation scheduling of a pumping station in East Route of South-to-north Water Diversion Project [J]. Energy Procedia, 2017, 105(5): 3031-3037.
- [2] 袁尧,刘超. 基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 38-44.
- [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.
- [4] Zhuan Xiangtao, Xia Xiaohua. Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps [J]. Applied Energy, 2013, 57(4): 250-257.
- [5] 周龙才. 多并联泵组的泵站运行优化[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 96-99.
- [6] 程千,周龙才,冯为民,等. 基于背包模型的泵站优化运行[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 168-172.
- [7] 鄢碧鹏,杜晓雷,刘超,等. 基于遗传算法和神经网络的泵站经济运行研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 80-82.
- [8] 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.
- [9] 郑和震,张召,吴辉明,等. 梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1558-1565.
- [10] 桑国庆,曹升乐,郭瑞. 基于分时电价的梯级泵站输水系统日优化运行[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 688-695.
- [11] 冯晓莉,仇宝云,杨兴丽. 大型复杂并联梯级泵站系统运行优化研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1058-1065.
- [12] 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, 2011, 29(3): 230-235.
- [13] 龚懿,程吉林,刘静森. 基于单机组试验选优的并联泵站群组合优化运行算法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 314-319.
- [14] 梁山城,夏培松. 水泵性能曲线拟合研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(4): 111-113.
- [15] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 222-226.
- [16] 张粒子,张伊美,叶红豆,等. 可选择两部制电价定价模型及其方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 59-65.