

井群泵站运行优化研究

王超, 朱满林*, 李小周, 闫天柱 (西安理工大学, 陕西西安 710048)

摘要 井群泵站水泵机组台数多, 装机功率大, 对其进行运行优化是减少能源消耗、降低供水成本的重要手段。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。以泵站提升 1 万 t 水耗电量最低为目标建立运行优化数学模型, 应用枚举法结合 matlab 软件编程求解所有开机组合提升 1 万 t 水的耗电量。计算结果表明, 不同开机组合提升 1 万 t 水的耗电量不同, 其中最大耗电量与最小耗电量相差 12.8%。选择合适的开机组合可以达到节约能源、降低运行成本的目的。

关键词 井群泵站; 并联运行; 枚举法; 运行优化

中图分类号 TU991 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)09-291-02

Operation Optimization of the Well Group Pumping Stations

WANG Chao, ZHU Man-lin*, LI Xiao-zhou et al (Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048)

Abstract The well group pumping station has a lot of pump units, the operation optimization of pumping station is an important means to reduce energy consumption and reduce the cost of water supply. In this research, we set up the nonlinear energy equations of the parallel operation of the pump, and solved the equations by Newton iteration method. Taking the minimum power consumption of supplying ten thousand tons of water as the objective, we established the mathematical model of operation optimization. Using enumeration method combined with matlab software programming, the power consumption was solved which used by all of water pump combination mode supply ten thousand tons of water. The calculation results showed that the power consumption of supplying ten thousand tons of water was different between different pump combinations, and the maximum difference reached 12.8%. The choice of suitable pump combination mode could achieve the purpose of saving energy and reducing the running cost.

Key words Well group pump station; Parallel operation; Enumeration method; Operation optimization

在满足供水要求的前提下, 泵站运行成本最小是供水工程所追求的目标。一般情况下, 供水成本的大小、水泵效率的高低总是与泵站的运行调度有关, 通过优化调度, 可显著降低泵站的运行成本^[1-2]。张焕俐等以水泵机组并联运行的总耗电功率最小为目标, 建立了各水泵机组的数学模型, 寻求并联水泵之间的最优流量分配, 以及流量变化时的最优启停泵顺序^[3]。周龙才在采用迭代法求解泵组工作参数的基础上, 以总流量需求为约束条件, 以总功率最小为目标函数, 建立了求解多泵并联最优开机组合的动态规划模型, 并开发了针对该模型的软件程序^[4]。泵站优化运行问题本质上属于组合优化调度问题。为了确定泵站的最优运行方式, 必须研究泵站中各台泵的工作特性, 然后根据实际工作条件, 按各台泵的性能, 计算确定泵站运行机组的最优组合^[5]。笔者以某井群泵站提升 1 万 t 水耗电量最低为目标建立数学模型, 通过牛顿迭代法求解并联运行水泵工况点, 应用枚举法结合 matlab 软件编程求解该工程所有开机组合提升 1 万 t 水的耗电量, 可据此选择最经济的运行方案。

1 数学模型及计算方法

1.1 某井群泵站工程概况 某井群泵站由 5 口井并联向高位水池供水, 如图 1 所示。每口井安装 3 台同型号潜水泵, 共安装 15 台泵, 其中 12 台工作, 3 台备用。

1.2 水泵性能曲线方程的拟合 根据水泵性能数据拟合出水泵 $Q-H$ 、 $Q-\eta$ 曲线方程如下^[6]:

$$H_{ij} = A Q_{ij}^2 + B Q_{ij} + C \quad (1)$$

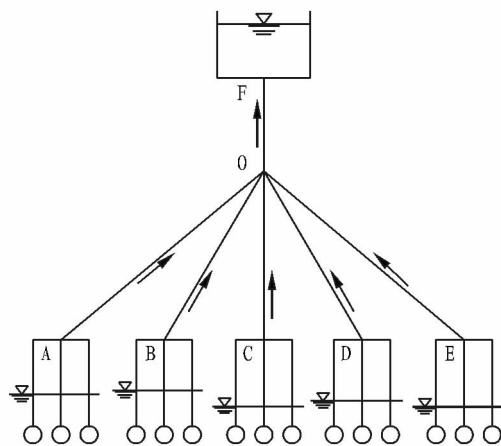


图 1 某井群泵站供水工程示意

Fig. 1 The schematic diagram of well group pumping station

$$\eta_{ij} = D Q_{ij}^3 + E Q_{ij}^2 + F Q_{ij} \quad (2)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为水泵性能参数; Q_{ij} 为 i 号井 j 台泵工作流量 (m^3/s); H_{ij} 为 i 号井 j 台泵工作扬程 (m); η_{ij} 为 i 号井 j 台泵机组效率 (%); $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 表示井序号; $j = 1, 2, 3$ 表示各井内泵序号。

1.3 水泵工况点的求解 按图 1 所示, 设各井后干管流量为 Q_i , 主干管流量为 Q , 则由连续性方程可得:

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

$$Q = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Q_{ij} \quad (4)$$

设各井静扬程为 H_i , 各井单位降深为 q_i , 各井内出水管阻力参数为 S_{ij} , 各井后干管阻力参数为 S_i , 主干管阻力参数为 S , 则水泵并联运行的非线性能量方程组可用下式表示:

$$F_{ij} = A Q_{ij}^2 + B Q_{ij} + C - H_i - \frac{\sum_{j=1}^3 Q_{ij}}{q_i} - S_{ij} Q_{ij}^2 - S_i \left(\sum_{j=1}^3 Q_{ij} \right)^2 -$$

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51479160)。
作者简介 王超(1991-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向: 供水工程理论与技术研究。* 通讯作者, 教授, 博士, 从事供水工程理论与技术研究。
收稿日期 2016-02-11

$$S(\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 Q_{ij})^2 = 0 \quad (5)$$

对(5)式求微分,可得:

$$\frac{\partial F_{ij}}{\partial Q_{ij}} = 2AQ_{ij} + B - \frac{1}{q_i} - 2S_{ij}Q_{ij} - 2S_i \sum_{j=1}^3 Q_{ij} - 2S \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 Q_{ij} \quad (6)$$

由牛顿迭代法^[7]可知:

$$F_{ij} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial Q_{ij}} \Delta Q_{ij} = 0 \quad (7)$$

所以可得:

$$\Delta Q_{ij} = \frac{-F_{ij}}{\partial F_{ij} / \partial Q_{ij}} \quad (8)$$

假定各泵初始流量为 $Q_{ij}^{(0)}$, 可求得校正流量为 $\Delta Q_{ij}^{(0)}$, 则各泵第 1 次校正后的流量为:

$$Q_{ij}^{(1)} = Q_{ij}^{(0)} + \Delta Q_{ij}^{(0)} \quad (9)$$

将(9)式写成迭代格式为:

$$Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{ij}^{(k)} + \Delta Q_{ij}^{(k)} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

采用上述方法逐次迭代,直到满足计算精度为止,即:

$$|\Delta Q_{ij}^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (\varepsilon \text{ 可取 } 10^{-5}) \quad (11)$$

通过以上计算可求得各台水泵的工作流量 Q_{ij} , 将 Q_{ij} 代入(1)、(2)两式可分别求得各泵的实际工作扬程和各机组的实际工作效率。

1.4 目标函数的建立 以井群泵站提升 1 万 t 水耗电量最小为目标,建立目标函数:

$$e = \min \left(\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \gamma Q_{ij} H_{ij}}{\eta_{ij}} \right) \quad (12)$$

$$360 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m Q_{ij}$$

式中, e 为井群泵站提升 1 万 t 水的耗电量(kWh/万 t); i 为井序号, m 为井序号总数; j 为井内水泵序号; n 为井内水泵序号总数; γ 为水的重度(9 800 N/m³)。

目标函数需同时满足单机流量非负约束和开机台数约束,即 $Q_{ij} \geq 0, l \leq 12$ (l 为开机台数)。

2 计算结果分析

应用枚举法结合 matlab 软件编程计算得到该工程不同开机组合和相应提取 1 万 t 水所耗电量的关系图,如图 2 所示,图 2 中横坐标表示不同开机台数,纵坐标表示不同开机组合提升 1 万 t 水的耗电量。

由图 2 可知,不同开机组合的 1 万 t 水耗电量相差较大。图 2 中每种开泵台数都有一个 1 万 t 水耗电量最低的开机组合,随着开泵台数的增多,相应的 1 万 t 水最低耗电量值也随之增大。

表 1 所示为 3 台泵运行时,不同开机方案工作点参数。由表 1 可清楚地看出,同一开泵台数下不同开机方案能耗相差较大,选择最优开机方案可节能 12.8%。

由表 2 可看出,运行 4 台泵的所有开机组合中,1 万 t 水最低耗电量为 5 841.329 kWh;运行 12 台泵的所有开机组合中,1 万 t 水最低耗电量为 6 289.965 kWh,二者相差 7.7%。由此可知,选择合适的开机方案,节能效果显著。

3 结论

泵站优化运行问题本质上属于组合优化调度问题,针对

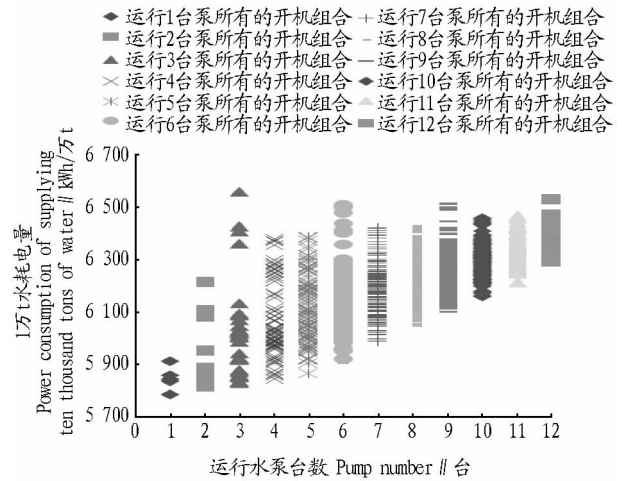


图 2 不同开机台数和相应万吨水耗电量关系

Fig. 2 Relationship between the pump number and the power consumption of supplying ten thousand tons of water

表 1 相同开泵台数、不同开机方案工作点参数

Table 1 Working point parameters of the same pump number and different pump combinations

编号 Code	开机组合 Pump combination	流量 Flow m ³ /s	1 万 t 水耗电量 Power consumption of supplying ten thousand tons of water //kWh/万 t
方案 1 Scheme 1	2 号井开 3 台泵	0.145	6 555.948
方案 2 Scheme 2	3、4、5 号井各开 1 台泵	0.161	5 826.559

表 2 不同开泵台数的最优开机方案工作点参数

Table 2 Working point parameters of the optimal pump combination under the same pump number

编号 Code	开机组合 Pump combination	流量 Flow m ³ /s	1 万 t 水耗电量 Power consumption of supplying ten thousand tons of water //kWh/万 t
方案 1 Scheme 1	1、3、4、5 号井各开 1 台泵	0.214	5 841.329
方案 2 Scheme 2	2、3 号井各开 1 台泵, 1、4、5 号井各开 2 台泵	0.416	6 046.459
方案 3 Scheme 3	1、2、3 号井各开 2 台泵, 4、5 号井各开 3 台泵	0.604	6 289.965

某井群泵站中各台泵的工作特性,用牛顿迭代法求解了不同组合情况下各台泵的工况点,通过优化调度,确定了不同工况下泵站运行机组的最优组合。针对目标函数,通过数值计算发现,井群泵站不同开机组合 1 万 t 水耗电量相差较大,不同开机组合 1 万 t 水耗电量最大相差 12.8%。在满足供水要求的前提下,选择最优的开机组合可以节约能源、降低运行成本。由该研究的计算结果可以看出,在用户需水量较小的情况下,选择开机台数较少的开机组合是比较经济的。

泵站优化运行问题的核心是正确求解出水泵工况点,该研究所用牛顿迭代法虽然能正确地求出各种工况下水泵的工况点,但是其计算过程复杂,工作量大,尤其是当能量方程组比较复杂时,对其进行偏导数求解比较困难;而且计算过程中要将非线性方程组线性化,忽略了高阶无穷小量,使得

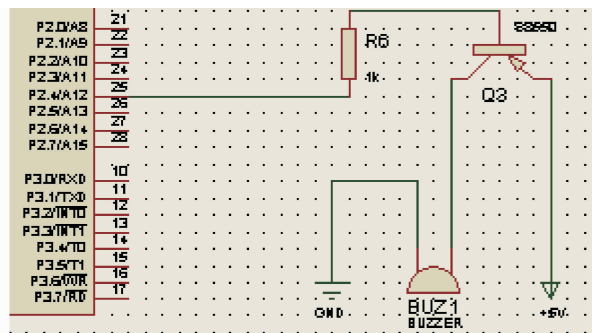


图 7 单片机控制蜂鸣器电路

Fig. 7 Buzzer circuit diagram controlled by single chip micro-computer

统功能,将整个软件划分为若干个功能相对独立易于解决的模块,每个模块是一个结构完整的子程序,能完成某一特定的任务,实现某个具体的功能。模块化程序结构清晰、组合灵活、可读性好、易于验证、可靠性高、便于功能扩充和版本升级,程序的修改可局部进行,还可建立频繁调用的子程序。

系统软件的设计,主要由如下程序模块组成: SHT10 温湿度采集、LCD 液晶显示屏控制、继电器控制、按键和蜂鸣器发声控制子程序。整个系统的主程序流程图如图 8 所示。

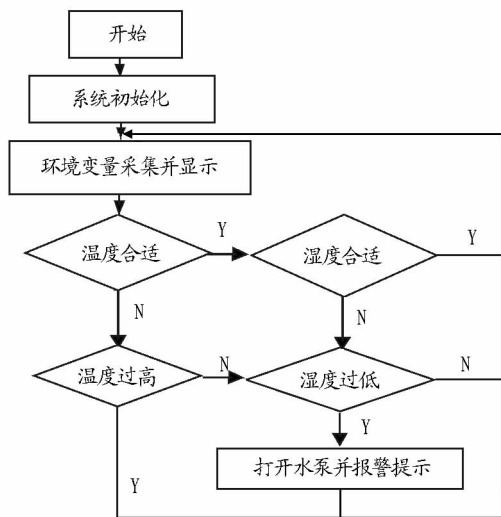


图 8 主程序流程

Fig. 8 The main program flowchart

系统在上电初始化后将土壤温度和湿度进行细致的判断,当土壤温度合适且湿度过低,进行灌溉加湿。通过上

述主体流程控制,即可达到有效的控制,使得室内环境基本处于花卉植物所需的最佳状态。

4 实验结果

基于土壤温度、湿度因子的自动喷灌控制系统,以 STC89C52RC 单片机为核心的控制电路、传感器电路和执行器件等组成,能够根据温度和湿度的设定值,达到实时浇灌控制,其监测界面效果图如图 9 所示。

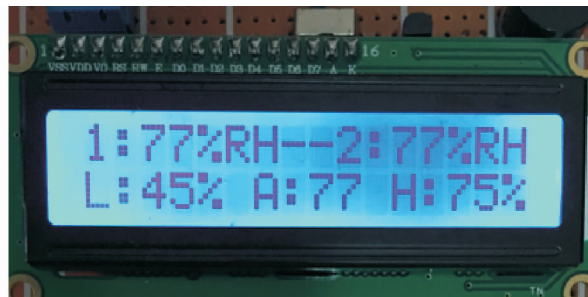


图 9 监测界面

Fig. 9 Monitoring interface

由图 9 可见,该系统能够实时在不同位置监测土壤湿度,并可设置湿度的上下限值,若监测湿度值低于设定的下限值,则水泵自动启动给花木浇水,直到其高于设定的下限值,停止浇水。

5 结论

该研究设计的基于 STC89C52 单片机的花卉自动浇灌系统能够做到给花木实时适量地浇水,既有利于花木生长,又可达节能的目的。系统硬件电路简单,经过实验调试,系统设计基本可以满足预期功能要求,电路稳定,抗干扰力强,性价比较高,应用前景广阔。

参考文献

- [1] 陈浩,周凯旋. 基于单片机控制的自动浇灌器设计[J]. 绵阳师范学院学报,2012(11):27-31.
- [2] 周颖,贾澄军,俞吉. 基于 AT89S52 单片机的花卉自动浇灌系统的设计[J]. 现代电子技术,2011,34(19):144-146.
- [3] 郝玮琳,彭照伟,耿庆波,等. 基于 ARM 的智能灌溉控制系统[J]. 中国农村水利水电,2006(5):24-27.
- [4] 李腾. 自动湿控、温控、光控、太阳能植物浇灌系统[J/OL]. 中国科技论文在线, [2016-01-05]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [5] 陈燕鹏,刘祖明,杨康,等. 一种智能灌溉控制器的研究与设计[J]. 安徽农业科学,2015,43(20):359-361.
- [6] 徐晓. 基于 AT89C51 的土壤温湿度数据采集与调节系统设计[J]. 科学技术与工程,2009(4):1032-1034.
- [7] 王先运. 微型自动喷灌控制系统的设计[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版),2009,9(4):255-257.
- [8] 郭正琴. 智能灌溉控制系统开发[D]. 北京:中国农业大学,2006:12-13.

(上接第 292 页)

计算精度降低,迭代次数增加。因此,找到一种简便快捷求解水泵工况点的方法是今后需要研究的方向。

参考文献

- [1] SCARPA F, LOBBA A, BECCIU G. Expedient pump rescheduling in multi-source water distribution networks [J]. Procedia engineering, 2015, 119(1):1078-1087.
- [2] ALIGHALEHBABAKHANI F, ABKENAR S M S, JIN S X, et al. Comparative evaluation of three distinct energy optimization tools applied to real water network (Monroe) [J]. Sustainable computing informatics & systems,

- 2015,8:29-35.
- [3] 张焕刚,胡浩,张德跃,等. 给水泵站优化运行的建模分析[J]. 中国给水排水,2013,29(17):47-50.
- [4] 周龙才. 多井联系组的泵站运行优化[J]. 灌溉排水学报,2014,33(1):96-99.
- [5] 张万台,路明利,吴秀云,等. 引滦工程东王庄暗渠泵站经济运行方案研究[J]. 水利学报,2004(8):94-97.
- [6] HU S, JIA X, GAO H. Optimization of the number of multiple pumps running simultaneously in open cycle cooling water system in power plant [J]. Energy procedia, 2012, 17(1):1161-1168.
- [7] 刘光临,匡许衡. 多泵并联供水系统水泵变速调节计算[J]. 中国农村水利水电,1997(6):15-18.