

多级串联加压泵站供水系统优化调度研究

蒋绍阶¹ 陈金锥² 张 智¹

(1 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045;

2 重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘要 结合白沙镇供水管网系统的特征,采用系统的观点和最优化的理论建立了该镇供水系统的多级串联加压泵站变时优化调度模型,对模型采用动态规划求解,得出一个调度周期内每级泵站开泵的最佳时段,为该镇供水系统的优化调度管理提供参考。

关键词 供水系统 多级加压泵站 优化调度 动态规划

1 白沙镇供水系统概况

白沙镇现有供水服务人口 4.5 万,水源为长江潜流水,有设计供水规模 $3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的水厂 1 座,现状水厂供水规模 $1 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。该镇供水管网干管总长约 10 km,管径 100 ~ 400 mm。供水系统包括 3 级泵站,4 个高位水池及相应的管网(见图 1),其规模小,最高日用水量变化系数 K_h 大(达 3)。该镇设置了 4 个高位水池。此外,白沙镇地形高差悬殊,供水区域最高点地面标高为 345.6 m,而最低点地面标高仅 208.6 m,地形起伏大,供水区域狭长,区域首末相差超过 3 km。因此该镇供水采用串联分区供水,设置 3 级加压泵站,各级泵站与相应的蓄水池相连。

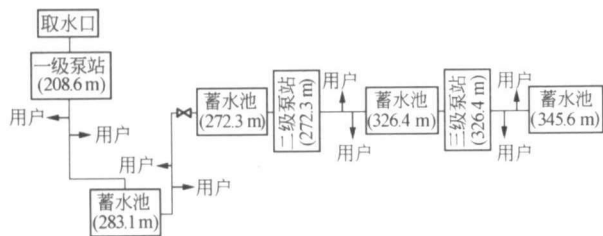


图 1 白沙镇供水系统

2 优化调度模型的建立

由图 1 可知,白沙镇供水管网系统有 3 级泵站系统,各个系统既相互联系又相对独立。因此,在空间上将其分解,形成几个由某一级泵站及其蓄水池所组成的子系统,对各级子系统分别进行优化并协调得到整个系统的优化调度策略。

据此,白沙镇供水系统可以划分为 3 个区域供水子系统:地面标高 208.6 m 一级泵站—地面标高 283.1 m 大旗山蓄水池—地面标高 272.3 m 二级泵

站蓄水池为一号区域供水子系统;地面标高 272.3 m 二级泵站—地面标高 326.4 m 贵州山蓄水池为二号区域供水子系统;地面标高 326.4 m 三级泵站—地面标高 345.6 m 黄角坪蓄水池为三号区域供水子系统。其中一号区域子系统与二、三号区域子系统通过阀门连接,在二级站抽水期间通过调节阀门开启度保持二级站蓄水池水位恒定(2.9 m),因此,调度建模中考虑将地面标高 272.3 m 二级泵站高位蓄水池去除,以简化系统的形式。

2.1 目标函数

白沙镇供水系统中可以调节的运行费用主要是三级泵站电能消耗费用。因此,本文以三级泵站电能消耗总和作为目标函数,目的是使三级泵站总的运行电耗最小。据此,可以建立白沙镇供水系统的费用目标函数:

$$\min f = \sum_{j=1}^n E_j \quad (1)$$

式中 n ——泵站级数编号, $n=1, 2, 3$;

E_j ——第 j 级泵站的供水电耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

E_j 主要与该泵站投入运行的水泵台数和型号有关,本供水系统中各级泵站投入运行的水泵数量均为 1 台。因此供水电耗仅与水泵是否开启及其消耗的功率有关。 E_j 可以表示为:

$$E_j = \sum_t \delta_{jt} P_{jt} T_t$$
$$P_{jt} = a_0 + a_1 Q_{jt} + a_2 Q_{jt}^2 \quad (2)$$

式中 k ——划分的计算时段;

P_{jt} ——第 j 级泵站在第 t 时段水泵消耗的功率, kW ;

δ_{jt} ——水泵开启状态,取 0 (关闭),或 1 (开启);

T_t ——第 j 级泵站第 t 时段内水泵运行的时间, h;

Q_{jt} ——第 j 级泵站第 t 时段供水量, m^3 ;

a_0, a_1, a_2 ——拟合参数。

综上所述,可以得到白沙镇供水系统优化调度的目标函数为:

$$\min f = \sum_j^n \sum_t^k P_{jt} \delta_{jt} T_t \quad (3)$$

2.2 约束条件

本文依据白沙镇供水管网的实际情况,为满足该镇供水管网系统的技术要求,建立如下约束条件:

(1) 管网的水力平衡约束

$$g(\bar{H}, \bar{q}, a) = 0 \quad (4)$$

式中 $\bar{H}$ ——节点压力向量;

$\bar{q}$ ——节点流量向量;

a ——管段摩阻。

(2) 高位水池的水位约束

在本文所述的供水系统中,各个高位蓄水池大小一样,蓄水量均为 $1\,000\text{ m}^3$,高度均为 4 m 。高位蓄水池必须满足水位上下限约束,即:

$$h_{j,\min} \leq h_{j,k} \leq h_{j,\max} \quad (5)$$

式中 $h_{j,k}$ ——第 j 级高位蓄水池第 k 时段水位, m;

$h_{j,\max}, h_{j,\min}$ ——第 j 级高位蓄水池水位上、下限, m。

(3) 水泵的开启次数约束

为便于人工调度管理,减少水泵过于频繁启动带来的电耗,结合白沙镇供水系统的特征,提出应该在约束条件中加入限制水泵开启次数的系统约束项。

$$N_{j,\min} \leq N_j \leq N_{j,\max} \quad (6)$$

式中 N_j ——第 j 级泵站水泵的开启次数;

$N_{j,\min}, N_{j,\max}$ ——第 j 级泵站水泵开启次数下限和上限,一个调度周期 24 h 内水泵开启次数应不大于 4 次。

以上构成了白沙镇供水系统优化调度问题的数学模型,该调度问题可以叙述为:在一个调度周期 24 h 内,在系统各个时段用水量以及系统中各不等式约束上下限值均已知的条件下,确定每一级泵站不同时间段的机组启闭情况,使供水电耗达到最小。

2.3 模型的求解

白沙镇供水管网系统优化调度问题的实质就是在满足系统用水量及其他约束条件的前提下,充分发挥高位蓄水池的调蓄作用,合理安排系统的生产运行,使得系统运行的能耗最低。该类模型属于多阶段决策问题^[1],可以利用动态规划寻求各个区域子系统的优化调度策略,将一个调度周期划分为几个有限的时段(如以 1 d 中的 24 h 为一个调度周期,当划分为 3 个时段的时候,每个时段 $\Delta t = 8\text{ h}$),计算出各个高位蓄水池的水位变化轨迹以及一个周期内水泵的最优开机时段。

根据动态规划的基本原理^[2],在寻求第 j 级泵站子系统的优化决策时,可以根据实际需要划分时段建立系统的状态转移方程。

对于第 j 级泵站的蓄水池,在第 k 个时段,建立系统的状态转移方程:

$$I_{j,k+1} = I_{j,k} + \frac{Q_{j,k} - (Q_{j-1,k} + q_{j,k})}{A_{j,k}} \quad (7)$$

式中 $I_{j,k+1}$ ——第 j 级蓄水池第 $k+1$ 个时段开始时水池的水位, m;

$I_{j,k}$ ——第 j 级蓄水池第 k 个时段开始时蓄水池的水位, m;

$Q_{j-1,k}$ ——第 $j-1$ 级泵站在第 k 个时段的供水量, m^3 ;

$Q_{j,k}$ ——第 j 级泵站在第 k 个时段的供水量, m^3 ;

$q_{j,k}$ ——第 j 级蓄水池所在子系统第 k 个时段的用水量, m^3 ;

$A_{j,k}$ ——第 j 级蓄水池第 k 个时段蓄水池平均断面面积(本例中 $A = 250$), m^2 。

在上述基础上,设定调度期末各高位蓄水池的水位,以供水电耗最小为目标,利用状态转移方程式(7),由调度期末始端方向逐段寻求最优运行策略,当得到最后一个子问题,即调度期末最初一个时段的最优解时,也就得到了整个调度周期的最优解及最优运行策略。

2.4 模型的验证

在 2005 年 11 月 21 日~12 月 21 日的 3 个区域子系统时用水量数据中,随机抽取 12 月 1 日进行了验证,为了提高优化运行方式与实际经验运行方式

的可比性,在试例验证时,调度期末即 1 日 23 时末的各水池水位设定取实际运行值,而使调度期初即 1 日 0 时各水池水位尽量接近实际运行值^[3];同时,为了提高控制精度,便于进行人工调度,将一个调度周期 24 h 划分为 24 个时段,1 h 为一个计算时段。经建模计算,各级泵站及整个系统的调度决策优化结果见表 1,各级高位蓄水池水位变化轨迹见图 2、图 3 和图 4。

表 1 白沙镇供水系统运行策略优化结果

项 目	一级泵站	二级泵站	三级泵站
经验运行电耗/(kW·h)	1 765. 3	829. 6	95. 2
优化运行电耗/(kW·h)	1 712. 3	816. 3	91. 3
优化节电率/%	3	1. 6	4. 3
总优化节电率/%	2. 7		

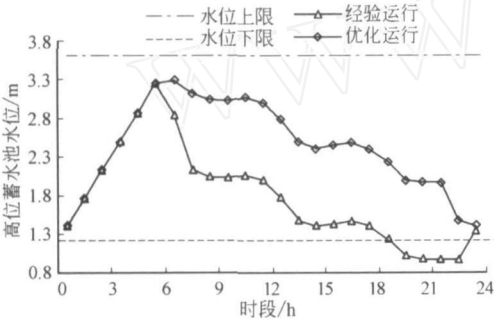


图 2 地面标高 283.1 m 大旗山高位蓄水池水位变化曲线

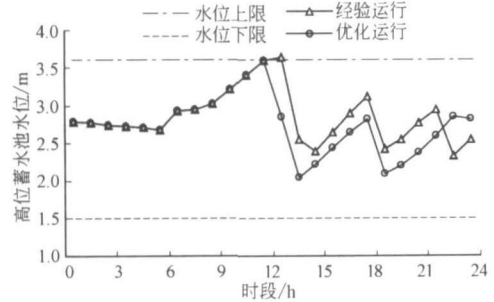


图 3 地面标高 326.4 m 贵州山高位蓄水池水位变化曲线

由表 1 可以看出,通过优化调度,12 月 1 日供电总能耗少于经验运行方式,优化节电率达 2.7%。电耗节省主要是通过减少各级水泵开机的次数而减少了水泵的启动能耗实现的。从图 2、图 3 和图 4 中可以看出优化后各级泵站高位蓄水池的水位基本上控制在上下限范围之内,充分利用了高位蓄水池的调蓄能力,保证了供水的安全可靠性。而经验的运行方式,时常出现水位达到警戒线或水位低于下限而导

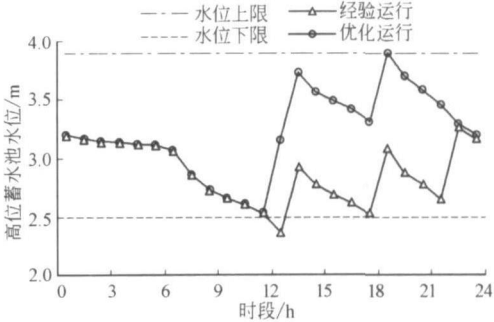


图 4 地面标高 345.6 m 黄角坪高位蓄水池水位变化曲线

注:各高位水池容积 1 000 m³,高度均为 4 m。

致水泵启动过于频繁的情况(如图 2 的 19~23 时段)。

3 优化调度的效果

由于白沙镇供水系统复杂,各种工况资料难以收集完整,导致各子区域用水量预测、优化调度决策等大量计算工作难以完成,只能在调度人员了解优化调度基本原理的基础上,利用以下方式对调度方案进行有限的优化: 各个区域用水量预测无法完成,只能采用前一天的供水量数据作为调度周期内供水量的计算; 管网系统工况建模难以完成,各级泵站不同工况下出口流量无法与高位蓄水池水位及用水变化规律结合,只能参照历史运行工况数据统计得出不同时段,不同用水变化特点下各级泵站的供水量。因此,本文在对运行优化调度决策计算时,泵站不同时段出口流量按照历史数据拟合估算得出; 运行调度实践中尽可能采用本文提出的优化运行方式,即在满足各种约束条件下,使供水运行能耗最低。

在这些有限的条件下,采用本文优化调度的结果,通过对重庆江津白沙镇供水系统的调度运行实践,可取得如下效果:

(1) 降低了供水系统存在的风险,提高了供水安全可靠。由于强调了对供水系统调度方案的优化,改变了调度人员观测高位水池水位后决定启停泵的习惯做法,在调度方案进行优化后,则不必等到水池水位到达上限再停泵,而是根据对供水系统整体调度方案进行通盘考虑,按照预先拟定的调度方案适时对各级高位蓄水池进行水量补充,避免了各级蓄水池水位超过警戒线或同时达到下限水位、同时需要补充水量的情况,增加了供水系统运行的安全可靠性。

(2) 降低了供水系统的能耗,节省了工人当班费用。优化调度可以使白沙镇供水系统降低电耗约2.7%,同时使得供水系统能够根据水量以及蓄水池水位的变化适时调整开机时段,因此,不必在每个蓄水池安排工人24 h值班,降低了工人的劳动强度,节省了人工费用开支。

(3) 降低了管网的漏损量,减少了爆管发生的次数。一般来讲,供水管网总是有一定的泄漏量的,特别是运行多年的管网。而这个泄漏量与运行压力有关,压力越高,泄漏量越大,因而降低运行压力可以减少泄漏量。优化开机时段及开机台数,改变习惯调度方式下供水系统运行压力时高时低的状况,可使供水系统较多地处于压力更为合理、均衡的运行状态,从而减少管网的水量漏失及爆管发生的可能性。

4 结论

(1) 建立了白沙镇供水系统多级串联加压泵站的逐时优化调度模型,对模型采用动态规划求解得出一个调度周期24 h内每级泵站开泵的最佳时段,

实现对该镇供水系统的优化调度。优化结果表明,供水系统优化运行后经济、社会效益明显。

(2) 白沙镇供水系统具有典型山地小城镇供水系统的特点,因此,本文中的建模方法也可以对那些地处山区、系统结构相似的山区城镇供水系统的优化调度建模起到借鉴作用。

参考文献

- 1 李继珊,刘光临,潘为平.多级泵站优化调度及经济运行研究.水利学报,1990,12(12):18~26
- 2 邓先礼.最优化技术.重庆:重庆大学出版社,1998
- 3 Shamir U. Computer applications for real-time operation of water distribution systems. Specialty conference on computer applications in water resource. ASCE. London,1985,379~390

□ 通讯处:400045 重庆大学B区3舍1022室

电话:(023)65127191

E-mail:jinzhui@163.com

收稿日期:2006-06-21

修回日期:2006-08-24



总工程师
土建工程师
暖通工程师
资料管理员

建筑材料工程师
概预算工程师
给排水工程师
质量管理员

路桥工程师
管道工程师
造价/估价师
项目经理

基础地下岩土工程师
监理工程师 电气工程师
市政工程师 结构师
测绘员 建筑师

• 广告 •

中国颇具影响力的建筑工程人才招聘网站

建筑英才网

www.buildhr.com

中国颇具影响力的建筑、房地产人才网站
中国高素质建筑、房地产专业人才数据库
企业会员免费试用,不限量发布招聘职位
个人会员免费求职

电话:010-82197168, 82197188, 13366562971, 13366562972

传真:010-82197596

邮箱:buildhr@buildhr.com

地址:中关村南大街12号信息楼6层 邮编:100081

