

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.008

# 城市供水系统调度优化新策略与应用

段万发, 王伟, 何金龙

(马鞍山首创水务有限责任公司, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:** 随着我国城镇化进程的加速和人民生活水平的不断提高,对城市供水系统提出了越来越高的要求。通过有效手段降低爆管概率甚至减少到零级,以此实现供水安全具有重大现实意义。以马鞍山市供水系统为例,基于冲量定理原则,通过对净水厂、加压站和用水大客户的供配水方式及调度方案进行优化升级,完成了供水系统的科学调度。自此调度方案实施一年多来,全市未发生自然爆管事故,实现了供水系统的“安全供水”目标。

**关键词:** 供水系统; 爆管; 科学调度; 压力控制; 冲量定理

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0046-05

## New Strategy and Application of Urban Water Supply System Scheduling Optimization

DUAN Wan-fa, WANG Wei, HE Jin-long

(Ma'anshan Capital Water Co. Ltd., Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** The accelerating urbanization process and continuous improvement of people's living standards lead to higher requirements for urban water supply system. It is of great practical significance to reduce the probability of pipe burst to zero by effective means, so as to realize safe water supply. Based on impulse theorem principle, the scientific scheduling of a water supply system in Ma'anshan was completed by optimizing and upgrading the water supply, distribution mode and scheduling schemes of waterworks, secondary pressurization pump stations and large water consumption customers. Since the implementation of the scheduling scheme more than a year, there has been no natural pipe burst incident in the city, and the safe water supply target of the water supply system has been realized.

**Key words:** water supply system; pipe burst; scientific scheduling; pressure control; impulse theorem

### 1 优化调度背景

#### 1.1 供水系统现状

近20年来,中国城镇水务事业蓬勃发展,各个城市逐渐形成了多水源、多水厂联合供水局面<sup>[1]</sup>。马鞍山市供水系统经过60多年的发展,现今已形成由一司运营、多水厂联合供水体系,供配水系统较为复杂。市区依靠采石水厂和慈湖水厂两座净水

厂通过南北对置的方式形成供水主力,另有分布在管网中的多处大型加压泵站(如南山矿泵站等)进行区域加压供水。

#### 1.2 优化调度意义

供水管网可靠性运行是整个城市供水系统的关键环节<sup>[2]</sup>。马鞍山市现有供水系统中,DN75及以上口径的供水管网总长度约1 492 km,虽然随着城

通信作者: 何金龙 E-mail: 1048607742@qq.com

市道路建设、老旧小区改造等项目的实施,供水公司也进行了相应的管道升级改造,但目前仍有30%左右是20世纪60~90年代建设的灰口铸铁管。由于这类管材质量参差不齐、施工质量不佳、管龄过大以及受到水锤、地质条件、人为因素的影响,爆管事故时有发生<sup>[3]</sup>。优化调度之前,在重大节假日期间发生了几起DN500、DN800、DN1 000等主干管爆管事故,不仅带来严重的水资源浪费和巨大的经济损失<sup>[4]</sup>,还引起舆情造成社会不良影响。

随着人民对美好生活的向往,保障供水安全是供水企业的重要责任和奋斗目标。因此,建立完善的供水调度系统和科学的调度方案,实现供水管网压力平稳波动,进而降低自然爆管概率,具有重大的现实意义<sup>[5]</sup>。

## 2 调度优化方案

供水系统中送水泵组突然启动/停车、阀门急开/急闭等外界因素使水的流速突然发生变化,从而引起水击(水锤)破坏管网。水锤的破坏力与水的动量有关,符合冲量定理。即:

$$F \cdot t = m \cdot v \quad (1)$$

式中: $F$ 表示作用在阀门或管道上的压力; $t$ 表示作用时间; $m$ 表示水的质量; $v$ 表示水的流速。

由公式(1)可知,在生产过程中,通过延长作用时间 $t$ ,减缓管网中水的流速变化,则可减小压力 $F$ ,即可实现管网压力平稳波动。

本研究将基于这一原则,从净水厂、加压站、用水大客户、员工技能培训等维度寻求消除水锤效应的方案,以实现供水管网压力平稳,减少或消除水锤,降低自然爆管事故概率。

### 2.1 净水厂调度优化

实践证明,送水泵房是管网压力波动的重要来源,优化送水泵组的运行调度方式对于改善供水管网运行稳定性与可靠性非常必要<sup>[6]</sup>。净水厂送水泵组的频繁启/停以及每次启/停时产生的压力陡升陡降变化,对管网压力影响极大,破坏性强。通过对管网水力模型和压力监测数据研究发现:①水泵机组的启/停次数过多是由于没有统筹考虑两座净水厂供水配比以及没有充分利用大型加压泵站清水池蓄水功能,而引起净水厂送水泵组运行组合搭配不合理导致的;②送水泵机组启/停时产生的巨大压力波动是由于水泵机组启/停操作模式不够精细、精

准导致的。鉴于此,在生产过程中对水泵机组启/停操作模式和供水调度方案进行了优化处理。

#### 2.1.1 改变水泵机组启/停操作模式

优化前开泵过程持续时间在3 min以内,特别是阀门开启过程持续时间只有90 s,这样急促的开泵操作导致管网压力陡升。水泵机组启动流程如下:启动指令→水泵启动→出水阀全开→启动完成。为降低这类操作所引起的管网压力波动,对现有水泵机组操作模式进行优化,并分两阶段进行:

第一阶段,将出水电动阀“快开快闭”操作优化成“缓开缓闭”操作。

采石水厂送水泵组出水管配置了电动偏心半球阀,此阀门可以进行开度控制。为评估送水泵组启动时,此电动偏心半球阀不同的开启方式对出厂水压力变化的影响,在实际运行过程中进行了多次实验,并筛选出4个代表性开启方式:实验一,阀门直接全开;实验二,阀门每开启4%,暂停1 min,直至全开;实验三,阀门每开启2%,暂停1 min,直至全开;实验四,阀门每开启4%,暂停8 min,直至全开。以上4种不同阀门开启操作模式得到的出厂水压力与时间曲线如图1所示。

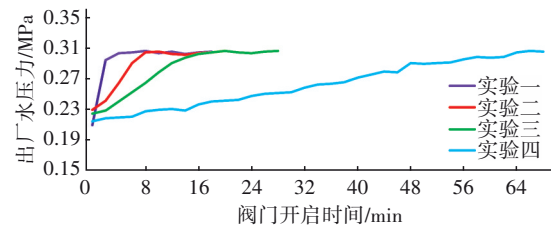


图1 阀门不同开启模式下出厂水压力变化

Fig.1 Variation of water pressure under different opening modes of valve

由图1可知,实验四的压力变化曲线较实验一平缓,说明延长阀门开启过程持续时间,可以降低单位时间出厂水压力波动幅度,减小管网压力波动。同时通过多次实验发现阀门开启到30%后,阀门再持续开启对出厂水压力变化影响甚微。综合以上实验数据,结合生产实际,对采石水厂送水泵房出水阀的操作模式优化如下:出水阀开启至4%开度,暂停8 min;开启至8%开度,暂停8 min;开启至12%开度,暂停8 min;开启至16%开度,暂停8 min;开启至20%开度,暂停8 min;开启至24%开度,暂停8 min;开启至28%开度,暂停8 min;开启至30%开度,暂停8 min;最后开启至100%开度。整个

阀门开启过程持续时间在65 min左右,阀门关闭操作反之。

第二阶段,将变频机组“粗犷调频”优化成“精细化精准化调节”。

采石水厂送水泵组共计5台,其中变频机组1台;慈湖水厂送水泵组共计4台,其中变频机组2台。优化前,两厂的变频机组启动/停止操作均是满频率启动/停止;运行过程中,手动调节频率时也是采取大跨度大区间调频。因变频器在使用过程中操作不够精细,使得出厂水压力忽上忽下波动。针对此类操作模式,在优化时进行了以下调整:

① 变频机组在启动时,先将机组开至40 Hz,待水泵机组运行稳定后,再按第一阶段优化的“缓开”模式开启出厂水阀门,至阀门全开后,则启动过程结束。

② 机组启动结束后,变频机组在运行过程中根据出厂水压力需要调节频率时,按0.5 Hz/次调节,每次操作后保持6 min才可进行下次调频,重复此操作,直至出厂水压力实际值达到设定值为止。

③ 变频机组停机时,按步骤②模式将频率降至40 Hz,待水泵机组稳定后,再按“缓闭”模式关闭出厂水阀门,至阀门关闭后将变频器缓慢停机,则水泵机组停机过程结束。

通过以上两个阶段优化,水泵机组启动操作流程如图2、3所示(水泵机组停机操作反之)。净水厂送水泵房水泵机组在实际运行中,采取工频泵组和变频泵组搭配运行。需要水泵机组切换时,尽量切换变频机组,减少工频机组的启停频次。

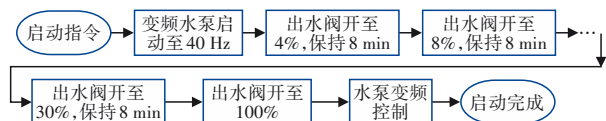


图2 变频水泵机组启动流程(优化后)

Fig.2 Startup process of variable frequency water pump unit (after optimization)

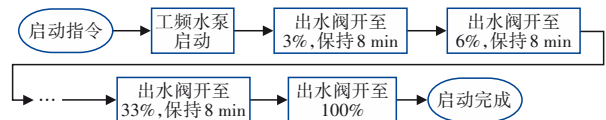


图3 工频水泵机组启动流程(优化后)

Fig.3 Startup process of power frequency water pump unit (after optimization)

以上两种启动模式适用于正常生产时操作,特别是工频泵组启动/停止时通过阀门缓开缓闭操作,

效果十分明显。由于此种操作模式持续时间较长,所以在水泵机组启/停调度时做好提前预估工作。

### 2.1.2 降低水泵机组启/停次数

优化水泵机组启/停操作模式之后,大大降低了出厂水压力波动,不可避免地也带来了操作过程的繁琐性、水头损失及能耗浪费等,在此基础上,进一步对泵组启/停次数进行了优化。

泵组启/停次数的优化主要是通过对历史数据的研究分析,建立了不同季节、天气、节假日以及每天不同时段供水需求<sup>[7]</sup>。统筹考虑采石水厂、慈湖水厂两个净水厂送水泵组参数,兼顾全市大中型加压泵站清水池调蓄功能,研究出不同时段水泵机组搭配组合。经多次摸索优化,目前两个水厂水泵机组启/停次数由以前的14次/d降低到4次/d,极大地降低了启/停次数。

## 2.2 加压泵站调度优化

市区规模化大型加压泵站共计5座,清水池容量共计 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,且在管网中分布不均。如果不科学调度运行,则会造成全市管网压力波动大,并对净水厂送水泵房运行造成不利影响<sup>[8]</sup>。

### 2.2.1 利用加压泵站清水池调蓄功能

优化前,全市各大中型加压泵站清水池全年均处于高水位、“恒水位”运行。这种运行模式存在的弊端有:① 在全市用水低峰时,加压泵站清水池处于高水位状态,无法吸收消化净水厂过剩的产能,此时为了保证管网压力,净水厂需减产,关闭送水泵组。② 在全市用水高峰时,加压泵站为了维持高水位、“恒水位”运行,会抢占管网中供水资源,造成管网压力不足、供水紧张等情况,此时净水厂需增产,开启送水泵组。

为充分利用加压泵站清水池调蓄功能,减少净水厂送水泵组启/停操作,满足高峰供水时管网压力需要,特对加压泵站清水池液位控制进行优化,以实现全市用水低峰时向清水池补水至高水位、全市用水高峰时清水池不进水或少流量补水<sup>[9]</sup>。

选取具有代表性的南山矿加压泵站进行优化分析。南山矿泵站现有清水池1座,总容积为 $5\,670 \text{ m}^3$ ,理论可调容积为 $4\,200 \text{ m}^3$ 。另经统计分析,该加压泵站供水需求低峰时平均送水量为 $410 \text{ m}^3/\text{h}$ ,高峰时平均送水量为 $1\,050 \text{ m}^3/\text{h}$ 。推算此泵站清水池在不进水的情况下,利用可调容积能够满足高峰供水时间为 $4 \text{ h}$ ( $4\,200 \text{ m}^3 \div 1\,050 \text{ m}^3/\text{h}$ )。而全市每日最



大的高峰供水时段是早上06:00—09:30,共计3.5 h(<4 h)。据此对南山矿加压泵站清水池调蓄优化如下:①在全市高峰供水时段,清水池进水阀全部关闭,不进水。②在其他时段,根据全市供水需求实时调节进水阀进水补充,保证在下一个高峰供水段前将水补充至高水位。

优化前后,南山矿加压泵站清水池液位曲线如图4所示。全市其他大中型加压泵站采取类似的优化措施。

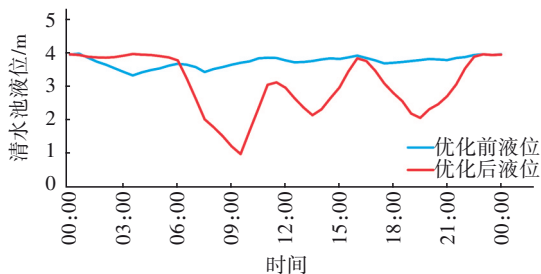


图4 南山矿加压泵站清水池液位优化前后对比

Fig.4 Liquid level in Nanshankuang pumping station before and after optimization

### 2.2.2 加压泵站清水池进水阀启/闭操作优化

优化前,加压泵站清水池进水阀也是“快开快闭”操作,引起周边管网压力波动在0.04 MPa左右。此阀门操作优化同净水厂出水阀,鉴于其启/闭过程对管网压力影响较净水厂出水阀小,则将其暂停时间由8 min换成2 min,此处不再赘述。

### 2.3 用水大客户优化

用水大客户作为城市供水系统调度过程中的重要环节,其可靠、稳定的用水在保证城市供水系统的稳健运行中具有至关重要的地位。在优化调度之前,整个调度体系忽视了大客户用水对管网压力的影响,造成时段性管网压力不足。

为弄清大客户用水需求、用水规律及用水系统架构等,供水公司安排专人走访并利用调度SCADA系统收集相关数据进行分析,提出优化方案。对有清水池用户,建议仿照加压泵站方案进行优化;对没有清水池用户建议其进水阀采用缓开缓闭操作。

### 2.4 员工综合素质的提升

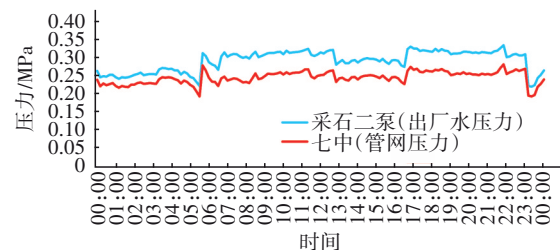
优化调度方案的制定容易实现,其难点及关键点在于各级员工是否能够同心协力共同实施。多年来的工作习惯致使员工产生了惯性思维,对爆管事件习以为常,在思想上没有引起足够的重视。孰不知爆管事件不仅造成供水企业及用户的双重损

失,也与政府提出的营造良好营商环境政策相冲突。

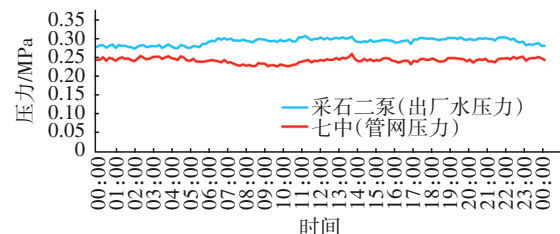
优化调度方案执行成效与员工的理论基础及实操经验息息相关,鉴于员工在优化调度实施过程中的重要性,公司从员工的思想认识、技能水平和供配水专业知识等方面进行了多次培训、模拟实验和实操训练。经过培训之后,公司上下统一了思想,消除了抵触情绪,并认识到优化调度的必要性,同时为上述的精准精细化调度及城市管网压力平稳控制提供了理论方案和实操保证。

### 3 实际应用成效

此优化调度方案自2020年5月17日在马鞍山首创水务公司开始实施,目前已推广到下属采石水厂、慈湖水厂和各大中型加压泵站等,同时也与全市大用户建立了良好的推广应用机制。通过调取SCADA系统数据,以采石水厂出厂水测压点和七中管网测压点为例,这2个测压点在优化调度方案实施前后压力变化如图5所示。



a. 调度优化前(2020年4月17日)压力曲线



b. 调度优化后(2021年4月17日)压力曲线

图5 调度优化前后压力变化

Fig.5 Variation of pressure before and after optimal scheduling

由图5(a)可知:①七中管网测压点和采石水厂出厂水压力曲线吻合度极高,表明出厂水压力波动对管网压力影响甚大。②每次启/停泵组均造成压力曲线陡升/陡降,痕迹明显。③以早上05:30开泵至05:35结束为例,出厂水压力由0.22 MPa上升至0.32 MPa,压力变化率为0.02 MPa/min。

由图5(b)可以看出:①七中管网测压点和采石

水厂出厂水压力曲线的吻合度较优化前有所降低。  
②泵组启/停痕迹无显现。③以早上05:35开泵至06:30结束为例,出厂水压力由0.27 MPa上升至0.30 MPa,压力变化率为0.000 54 MPa/min,优化后压力曲线波动明显降低,管网压力情况得到了极大改善。

#### 4 结论

多水厂协同区域加压泵站供水系统的调度一直是城市供水系统优化运行面临的重大技术课题,事关供水系统可靠性及可持续发展。以马鞍山市供水系统为例,从净水厂送水泵组启/停操作模式、大中型加压泵站清水池调蓄等4个方面叙述了优化调度措施及方案,并经实践应用取得了一定的效果。随着调度方案的深入应用,管网压力波动逐渐趋于平稳,截至目前全市未发生DN500以上主干管自然爆管事故,相较于2018年的3起、2019年的5起和2020年1月—4月的2起自然爆管事故来说,极大地降低了爆管次数和概率。

#### 参考文献:

- [1] 尹兆龙,信昆仑,项宁银,等. 城市供水系统优化调度现状与展望研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(1): 51-55.  
YIN Zhaolong, XIN Kunlun, XIANG Ningyin, *et al.* Present situation and prospect of optimization scheduling for urban water supply system [J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(1): 51-55 (in Chinese).
- [2] 陶涛,夏禹,信昆仑,等. 分散复杂多水源原水系统一级优化调度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(12): 1772-1776.  
TAO Tao, XIA Yu, XIN Kunlun, *et al.* First-class optimization operation of distributed complex multi-source raw water system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(12): 1772-1776(in Chinese).
- [3] 张志磊,蒋白懿,李博,等. 供水管网爆管原因分析与预测研究[J]. 供水技术, 2014, 8(5): 13-17.  
ZHANG Zhilei, JIANG Baiyi, LI Bo, *et al.* Analysis and prediction of pipe burst causes in water supply network [J]. Water Technology, 2014, 8(5): 13-17 (in Chinese).
- [4] BICIK J, KAPELAN Z, MAKROPOULOS C, *et al.* Pipe burst diagnostics using evidence theory[J]. Journal of Hydroinformatics, 2010, 13(4): 596-608.
- [5] 郭芝瑞. 基于专家系统理论的城市供水管网安全预警系统构建[D]. 太原:太原理工大学, 2016.  
GUO Zhirui. The Warning System Construction of Water Supply Network Security Based on Expert System Theory [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [6] 陈艳慧,李志鹏,杨国强,等. 基于能耗系数指标的供水泵站耗能研究[J]. 给水排水, 2014, 40(5): 147-150.  
CHEN Yanhui, LI Zhipeng, YANG Guoqiang, *et al.* Study on water supply pump station energy consumption based on energy consumption coefficient index [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(5): 147-150(in Chinese).
- [7] 顾建强,刘海星,张朝,等. 基于自适应卡尔曼滤波的用水量预测和爆管诊断[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 62-67.  
GU Jianqiang, LIU Haixing, ZHANG Chao, *et al.* Flow prediction and burst diagnosis based on adaptive Kalman filter[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 62-67(in Chinese).
- [8] 张嘉恩. 关于水泵机组节能运行的制约因素分析及改进建议[J]. 给水排水, 2013, 39(4): 103-107.  
ZHANG Jia'en. Analysis on restriction and improvement of energy-saving operation of water pump unit [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(4): 103-107(in Chinese).
- [9] 白华清. 基于水量与水质调控的平原地区加压站设计[J]. 四川建筑, 2020, 40(2): 312-314.  
BAI Huaqing. Design of pressure station in plain area based on water quantity and quality control [J]. Sichuan Architecture, 2020, 40(2): 312-314(in Chinese).

**作者简介:**段万发(1963—),男,安徽和县人,大学本科,高级工程师,主要从事自来水公司运营管理工作。

**E-mail:**duanwf@capitalwater.cn

**收稿日期:**2021-06-30

**修回日期:**2021-11-26

(编辑:任莹莹)