

# 水力模型在复杂工况下原水泵站 优化调度中的应用

卢文宝

上海威派格智慧水务股份有限公司, 上海

收稿日期: 2023年9月4日; 录用日期: 2023年10月4日; 发布日期: 2023年10月12日

## 摘要

笔者以中部某城市原水取水泵站改造项目为例, 介绍了基于供水管网水力模型在多目标和复杂工况下泵站设计选型和优化调度上的应用。在建模技巧上采用“水池 + 出水节点”的形式模拟水厂进水, 将流量驱动模型转化为压力驱动模型, 实现了原水泵站不同工况对多水厂进水流量的影响评估。通过优化后的供水管网水力模型, 在设计上解决了诸如多水厂进水分配的边界条件问题、定速泵和调速泵能耗效果分析、泵站场地设计标高确定问题和不同用水规模情况下的泵站优化调度问题。

## 关键词

水力模型, 优化调度, 原水泵站

# Application of Hydraulic Model in Optimal Scheduling of Raw Water Pumping Station under Complex Conditions

Wenbao Lu

Shanghai Weipaige Smart Water Co., Ltd., Shanghai

Received: Sep. 4<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 4<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The author takes the reconstruction project of the raw water intake pumping station in the central city A city as an example, and introduces the application of the hydraulic model of the water supply network in the design selection and optimal scheduling of the pumping station under multi-objective conditions.

tive and complex working conditions. In terms of modeling skills, the form of “pool + water outlet node” is used to simulate the water inflow of the water plant, and the flow-driven model is converted into a pressure-driven model, so as to realize the impact assessment of the different water supply pressure of the original pumping station on the distribution of water inflow in multiple water plants. Through the optimized hydraulic model of the water supply network, the boundary conditions of the influent water distribution in multiple water plants that are sensitive to influent pressure, the analysis and selection of the energy consumption effect of the fixed-speed pump and the speed-regulating pump, and the design elevation of the pumping station site are solved in the design. Identify the problem. In pumping station scheduling, the optimal scheduling decision-making problem of pumping stations under different water consumption scales is determined.

## Keywords

Hydraulic Model, Optimal Scheduling, Raw Water Pump Station

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

国外在供水管网建模方面起步于 20 世纪 60 年代[1]。20 世纪 80 年代,随着计算机及相应技术的发展,遥测远传设备的应用进入了实用化阶段,国内已有很多供水企业实现了供水管网建模。供水管网系统建模,就是为仿真模拟管网系统动态实时运行情况建立数学模型。建立供水管网模型,可及时了解管网的运行状态,分析管网运行瓶颈,同时可对管网优化改扩建、事故处理分析等起指导作用,另外可进一步应用于管网漏损控制、水泵优化调度及水质分析等方面,可在供水企业实际工作中发挥重要作用[2] [3]。

## 2. 模型建立优化

在管网运行优化计算研究中,需水量预测模型是运行优化的基础[4]。模拟了从调蓄池取水至原水泵站至水厂供水的过程,以往在建立模型时通过将水厂概化为用水节点以流量驱动形式模拟泵站向水厂供水过程,往往在用水量较大时管网出现负压,与实际情况不符。通过优化管网模型构建方式,采用“水池 + 用水节点”方式转化为压力驱动模型,一方面能够表达出二泵站加压供水或者重力供水时,水压对进水流量的影响,即水压不足时进水流量减小甚至不进水。另一方面随着水池水位升高,对进水流量抑制作用,通过用水节点模拟水厂实际出水情况,达到降低水池水位促进进水作用,更符合实际运行情况。反之当达到某一水位时,水厂将停止进水。将流量驱动模型转化为压力驱动模型是本项目准确性和后续设计方案的关键。

如图 1,目前市内由一水厂供水规模为 6 万吨/天、二水厂供水规模为 8 万吨/天,由南水北调原水管供水。为充分利用来水富余水头,取水管接自南水北调管线调压塔,多余水量溢流至西水坡调蓄池。随着区域原水需求量的不断增加,需改造原水取水泵站,设计规模为 14 万吨/天。通过泵站内阀门控制达到低峰时由调压塔重力流供水,高峰时由泵站取水自调蓄池加压供水,在不同用水情况下两座水厂重力流和压力流进行不同组合转换。复杂工况下对泵组设计选型以及泵站调度提出更高要求,传统设计计算方式难以应对。因此,通过构建管网水力模型计算重力流最大进水量,原水泵站场地标高设计、重力流供水与加压供水的选择边界,泵站运行最优化调度提供决策支持。



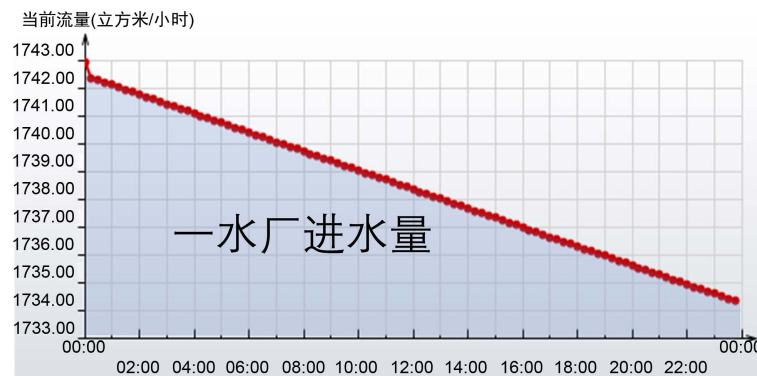
Figure 1. Raw water pipeline diagram  
图 1. 原水管线图

### 3. 不同工况分析

通过泵站内不同阀门的组合设置，能够达到一水厂和二水厂重力流供水、一水厂和二水厂加压供水、一水厂重力流二水厂加压供水、一水厂加压二水厂重力流供水等多种工况。在不同工况下需满足水厂进水压力和流量要求和边界。

#### 3.1. 重力流供水论证

用水低峰时，为充分利用南水北调管网来水富余水头，采用直接重力流供水方式。其中需满足一水厂进水水位 56.5 m，模拟计算进水流量为 4.17 万吨/天；需满足二水厂进水水位 58.3 m，模拟计算进水流量为 4.11 万吨/天。当采用重力流供水时，两水厂进水量差别不大，总计能够满足 8.28 万吨/天的日用水量，占最大日用水量 14 万吨/天的 59.14%，在夜间或冬季用水量较小时采用重力流供水方式。如图 2。



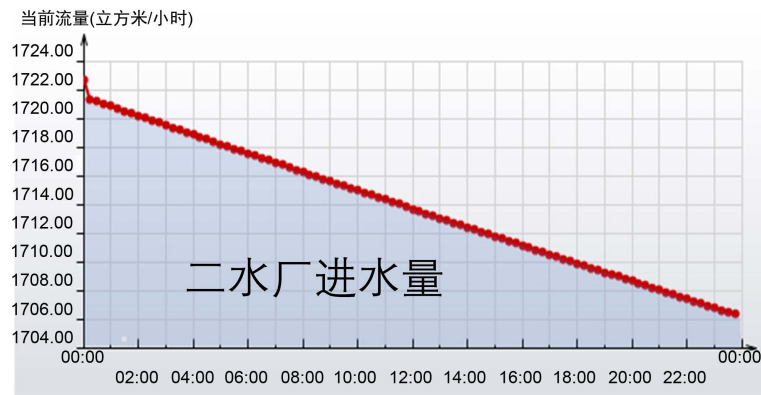


Figure 2. Influent flow of the first water plant and the second water plant  
图 2. 一水厂、二水厂进水量

### 3.2. 压力流供水论证

通过优化泵站内阀门的控制，实现重力流供水和压力流供水的工况转换，如图 3。当两座水厂均采用压力流供水时，开启 1#水泵对一水厂加压供水，开启 3#水泵对二水厂加压供水，2#泵作为备用泵。

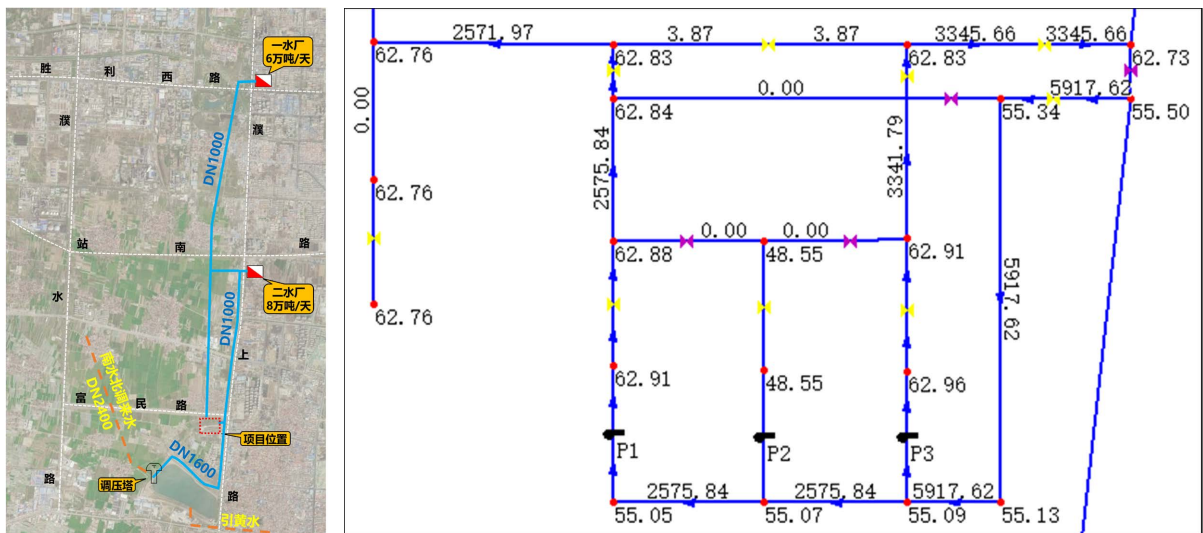


Figure 3. Nodal water pressure and line flow  
图 3. 节点水压和管线流量

由模拟分析结果，泵站进水处压力 55.50 m，一水厂和二水厂加压供水后，一水厂最高水位 56.66 m，二水厂 58.52 m。其中一水厂进水流量为 2510~2580 m<sup>3</sup>/h，日进水量 6.06 万吨/天。二水厂进水流量为 3340~3355 m<sup>3</sup>/h，日进水量 8.03 万吨/天。

对泵站设计参数进行了校核，两座水厂采用加压供水后，日供水量为 14.09 万吨/天，泵站进水压力和水厂最高水位均能满足设计要求。

### 3.3. 一水厂加压供水

关闭 3#水泵，二水厂采用重力流供水，并分别设置 1#泵为额定转速和变频调速情况下，对各水厂进水流量分析。

如图 4、图 5 所示，由模拟分析结果，当 1#泵采用额定转速运行时，一水厂进水量达到 2966 m<sup>3</sup>/h，二水厂重力流供水，最小进水流量为 1016 m<sup>3</sup>/h。因一水厂进水量较大，需要去通过阀门控制进水量，造成较大能量损失，经济效益不高。

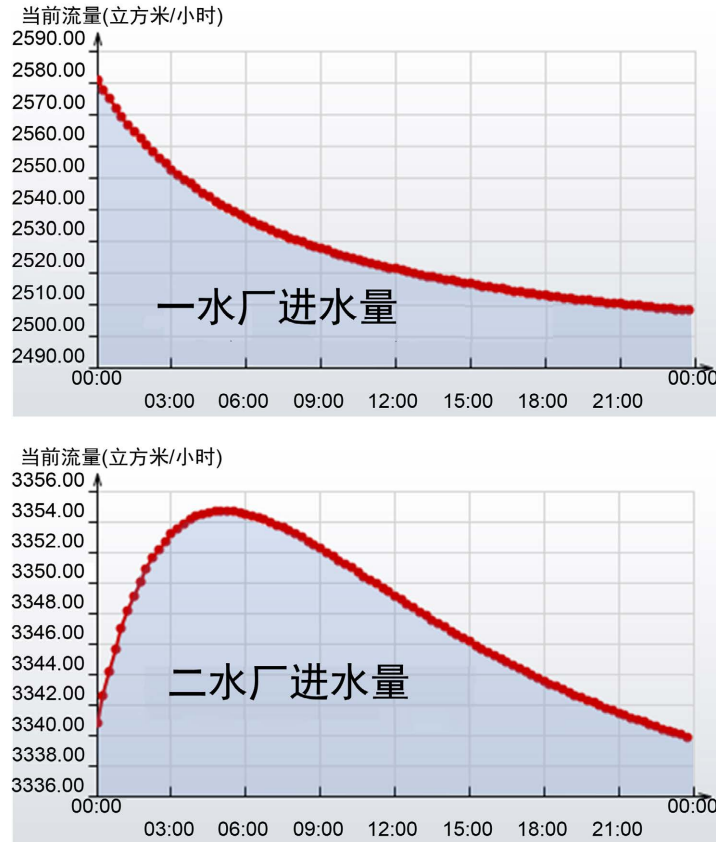


Figure 4. Influent flow of the first water plant and the second water plant  
图 4. 一水厂、二水厂进水量

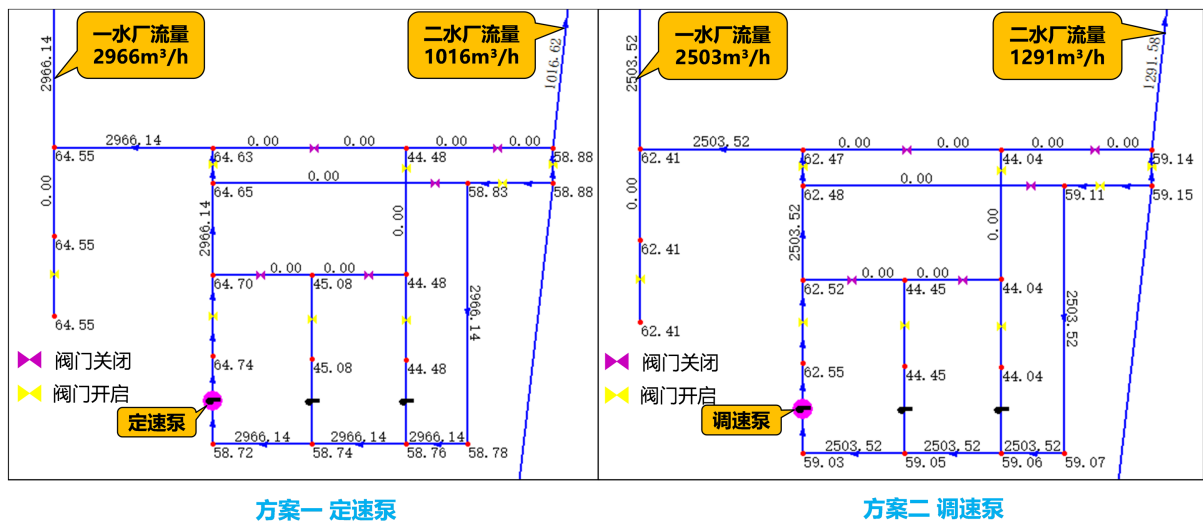


Figure 5. 1# Pump constant speed and speed regulation scheme comparison  
图 5. 1#泵定速和调速方案对比

采用调速泵，一水厂进水流量为 2500~2503 m<sup>3</sup>/h，日进水量 6.0 万吨/天。二水厂重力流，进水流量为 1290 m<sup>3</sup>/h，日进水量 3.10 万吨/天。进水过程曲线如图 6。

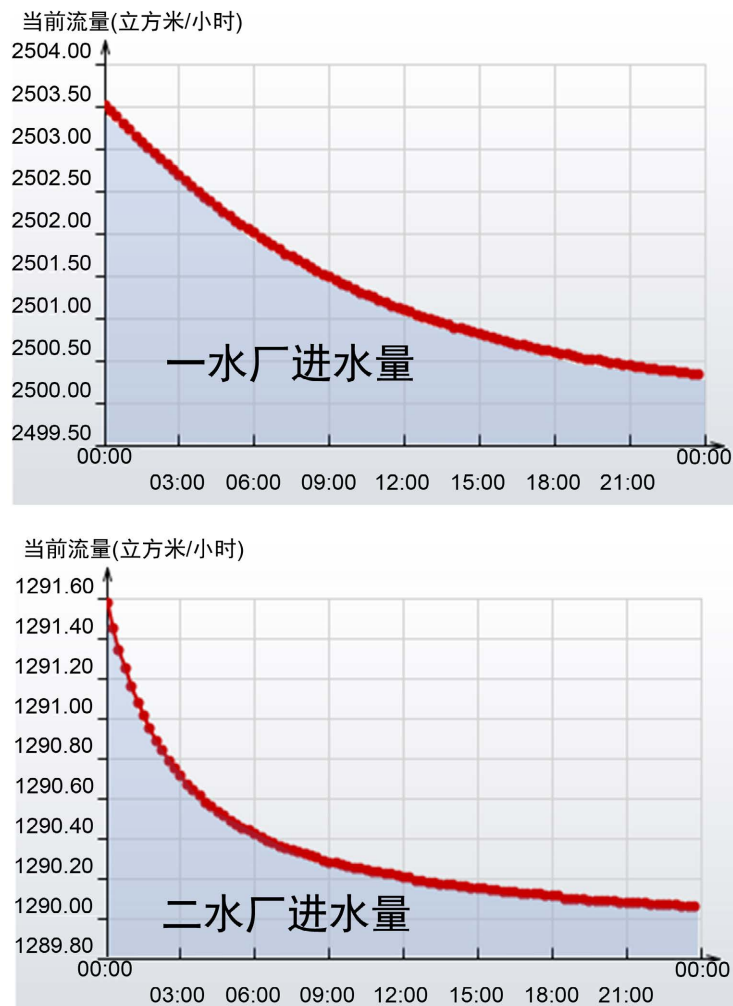


Figure 6. Influent flow of the first water plant and the second water plant  
图 6. 一水厂、二水厂进水流量

由对比方案，确定采用 1#泵为变频调速泵方案较为经济合理，调速比为 0.8。同时因一水厂采取泵站加压供水，对二水厂重力流流量影响较大，由最大重力流流量 4.11 万吨/天减少为 3.10 万吨/天。即二水厂采用重力流供水时，随着一水厂加压供水流量的增加而减小，二水厂重力流最大可供水量为 4.11 万吨/天，最小可供水量为 3.10 万吨/天。

### 3.4. 二水厂加压供水

关闭 1#水泵，一水厂采用重力流供水，并分别设置 3#泵为额定转速和变频调速情况下，对各水厂进水流量分析。

如图 7、图 8 所示，由模拟分析结果，当 3#泵采用额定转速运行时，二水厂进水量达到 3651 m<sup>3</sup>/h，一水厂重力流供水，最小进水流量为 1101 m<sup>3</sup>/h。因二水厂进水量较大，需要去通过阀门控制进水量，造成较大能量损失，经济效益不高。

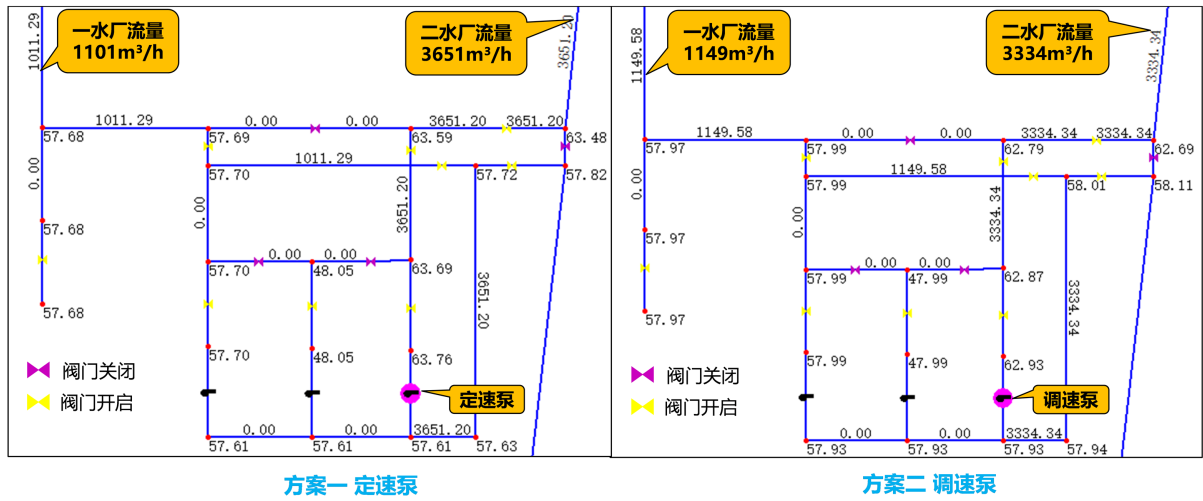


Figure 7. 3# Pump constant speed and speed regulation scheme comparison  
图 7. 3#泵定速和调速方案对比

一水厂重力流，进水流量为 1020~1140 m<sup>3</sup>/h，日进水量 2.52 万吨/天。采用调速泵，二水厂进水流量为 3333~3346 m<sup>3</sup>/h，日进水量 8.02 万吨/天。

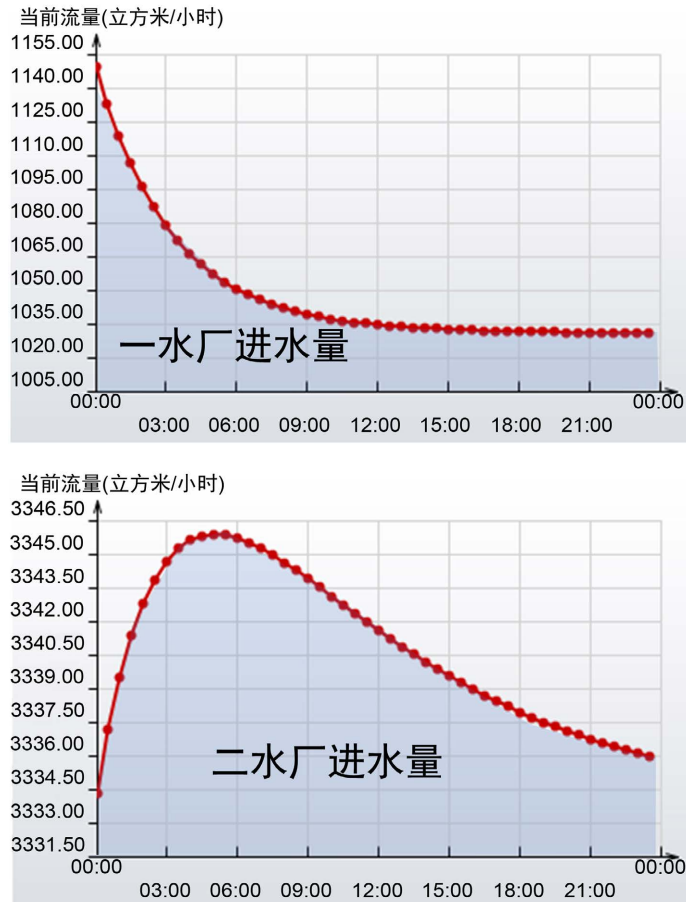


Figure 8. Influent flow of the first water plant and the second water plant  
图 8. 一水厂、二水厂进水量

由对比方案，确定采用 3#泵为变频调速泵方案较为经济合理，调速比为 0.9。同时因二水厂采取泵站加压供水，对一水厂重力流流量影响较大，由最大重力流流量 4.17 万吨/天减少为 2.52 万吨/天。即一水厂采用重力流供水时，随着二水厂加压供水流量的增加而减小，一水厂重力流最大可供水量为 4.17 万吨/天，最小可供水量为 2.52 万吨/天。

#### 4. 场地标高设计

现状场地标高为 52.2 m，考虑来水压力不足，为满足叠压供水设备进水压力 5 m 的要求[5] [6] [7]。本项目原水泵站采用半地下式，场地设计标高方案如表 1。

Table 1. Site elevation scheme comparison table

表 1. 场地标高方案比选表

项目	方案一：挖深 3.2 m	方案二：挖深 4.5 m
场地标高(m)	49 m	47.7 m
设备进水口标高(m)	50.5 m	49.2 m
泵站最大进水量(m <sup>3</sup> /h)	5833 m <sup>3</sup> /h	6465 m <sup>3</sup> /h
一水厂流量(1#泵需运行时间)	2500 m <sup>3</sup> /h (24 h)	2790 m <sup>3</sup> /h (21.5 h)
二水厂流量(3#泵需运行时间)	3333 m <sup>3</sup> /h (24 h)	3675 m <sup>3</sup> /h (21.8 h)
泵站进口总水头(m)	55.5 m (满足进口压力要求)	54.3 m (满足进口压力要求)
开挖土方量(m <sup>3</sup> )	1664 m <sup>3</sup>	2340 m <sup>3</sup>

场地标高不同影响泵站进水流量，通过模型验证确定在采用挖深 3.2 m 方案时，泵站进水压力总水头 55.5 m，能够满足设备进水压力要求和泵站运行进水流量要求。

#### 5. 泵站优化调度

前述分析了各种极端工况下，包括了一座水厂满负荷运行另一座水厂完全重力流供水情形，在实际供水情况下较少出现此种工况。因此做出如下假设：

- 1) 一水厂、二水厂供水量随季节周期水量变化一致；
- 2) 不考虑一水厂、二水厂管线之间阀门调节水量。

分析实际日用水量  $Q$  占比最大日供水量  $Q_{max}$  不同比例情况下，泵站开启调度情况。

通过模拟分析如表 2，当  $Q/Q_{max} = 51.37\%$  时，即实际用水量达到 7.19 万吨/天，一水厂日供水量为 3.08 万吨/天，任可以采用重力流供水，二水厂日供水量达到 4.11 万吨/天，达到重力流供水量限制。

当  $Q/Q_{max} = 63.0\%$  时，即实际用水量达到 8.82 万吨/天，一水厂日供水量为 3.78 万吨/天，达到采用重力流供水限制，二水厂日供水量达到 5.04 万吨/天，需要通过加压供水。

Table 2. Pumping station scheduling analysis table

表 2. 泵站调度分析表

实际供水量/最大供水量	<51.37%	51.37%	51.37%~63.00%	63%	>63%	100%
实际供水量(万吨/天)	$Q < 7.19$	7.19	$7.19 < Q \leq 8.82$	8.82	$8.82 < Q \leq 14$	14.00
一水厂(万吨/天)	重力流供水	3.08	3#泵开启	3.78	3#泵开启 1#泵开启	6.00
二水厂(万吨/天)		4.11		5.04		8.00



调度总结如下:

- 1) 当  $Q/Q_{\max} < 51.37\%$ , 全部采用重力流供水;
- 2) 当  $51.37\% < Q/Q_{\max} < 63.00\%$ , 开启 3#水泵调速供水二水厂, 一水厂重力流供水;
- 3) 当  $63.00\% < Q/Q_{\max}$  时, 开启 3#水泵调速供水二水厂, 开启 1#泵调速供水一水厂;
- 4) 采用一水厂泵站供水, 二水厂重力流供水与实际供水情况不符。

## 6. 结论

传统水力模型中存在的弊端即假定节点用水量为定值, 实际上用水量是压力的函数并非恒定的, 导致管网建模时节点流量与实际工况不符, 模型准确度低的问题[8]。因此在建模过程当中选择合理的建模和概化方式对提高模拟结果的准确性至关重要, 采用“水池 + 出水节点”的形式模拟水厂进水, 将流量驱动模型转化为压力驱动模型, 比较巧妙的避免了上述问题。给水管网运行优化是管网模型的最重要应用之一[9] [10]。通过供水管网模型的分析不仅确定了设计方案在多种运行工况下可行性, 同时量化了不同城市用水量的情况下的调度方式, 为方案决策提供科学依据。

## 参考文献

- [1] 段焕丰. 城市供水系统动态建模技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2006.  
<https://doi.org/10.7666/d.y851406>
- [2] 刘遂庆. 给水管网建模和科学调度软件技术与应用[C]//城市给排水管网建设, 运营及管理研讨会. 城市给排水管网建设, 运营及管理研讨会论文集, 2006.
- [3] 江锐, 王国芳, 朱银慧, 陈丹旒, 冯良杰, 李叶茂, 沈妙苗. 水力模型在供水管网运行管理中的探索与应用[J]. 城镇供水, 2022(5): 57-60.
- [4] 谢善斌, 蒋怀德. 给水管网运行优化计算方法研究进展[J]. 中国给水排水, 2011, 27(16): 9-12.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 303-2008 稳压补偿式无负压供水设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009-06-01.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 302-2008 箱式无负压供水设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009-06-01.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 415-2013 城镇供水管网加压泵站无负压供水设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013-05-01.
- [8] 张敏. 城市供水管网基于压力驱动节点流量模型漏失控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
<https://doi.org/10.7666/d.D270589>
- [9] 王煜明. 供水管网水力模型建模工程实施与管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2019: 7-9.
- [10] 张皓, 何通, 王天元. 供水管网水力模型建设及在供水规划中的应用[J]. 供水技术, 2020, 14(3): 13-18.