

# 城市原水系统调度研究与应用综述

顾正华<sup>1</sup>,周统<sup>1</sup>,翁晓丹<sup>2</sup>,申屠华斌<sup>2</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122)

**摘要:**从城市原水系统调度的理论研究、软件开发和工程实践三方面,回顾了国内外城市原水系统调度的研究进展;探讨了原水调度与水资源配置和水库群调度的区别,分析了模拟调度和优化调度的优势和不足,归纳了智能调度的技术要点并总结其在原水公司中的实际应用;介绍了常用原水调度仿真软件的计算机制和特点,分析了智能调度软件开发中决策支持系统的应用途径;通过国内外规模各异的城市原水系统调度工程案例分析了原水调度在合理利用水资源、提高供水效率、应对突发事件等方面的实际价值。指出未来的研究方向包括:加强城市原水系统智能调度理论研究,构建适用面广、可操作性强的城市原水智能调度系统;提高城市原水系统调度目标的预测精度与时效性;建立科学的城市原水系统应急调度预案库;形成满足生态与发展需求的城市原水系统调度评价体系。

**关键词:**城市原水系统;原水调度;理论研究;软件开发;工程实践;综述

**中图分类号:**TV213.4;TU991 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)05-0010-08

**Review of research and application on urban raw water system scheduling**//GU Zhenghua<sup>1</sup>, ZHOU Tong<sup>1</sup>, WENG Xiaodan<sup>2</sup>, SHENTU Huabin<sup>2</sup>(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** The research progress of urban raw water system scheduling was reviewed both domestically and internationally from three aspects, including theoretical research, software development and engineering practice. The differences between raw water scheduling and water resource allocation as well as reservoir group scheduling were discussed, the advantages and disadvantages of simulation scheduling and optimization scheduling were analyzed, and the development of intelligent scheduling technologies and corresponding application in raw water companies were summarized. The characteristics of simulation software and decision support systems in the field of raw water scheduling were introduced and the application approach of decision support system in intelligent scheduling software development was analyzed. Through analyzing engineering cases of urban raw water systems of various scales domestically and internationally, the practical value of raw water scheduling was analyzed in the aspects of rational use of water resources, improving water supply efficiency and responding to emergencies. It is pointed out that future research directions include strengthening theoretical research on intelligent scheduling of urban raw water systems, establishing urban raw water intelligent scheduling systems with wide applicability and strong operability, improving the prediction accuracy and timeliness of scheduling targets for urban raw water systems, establishing a scientific library of emergency scheduling plans for urban raw water systems, and forming an evaluation system for urban raw water system scheduling that meets ecological and development needs.

**Key words:** urban raw water system; raw water scheduling; theoretical research; software development; engineering practice; review

原水作为保障生活生产的主要水源,其供水安全不仅直接影响社会稳定,还与城市的可持续发展和生态环境保护息息相关。随着城市经济的发展和人口的增长,城市需水量持续增加,分布不均的水资源已不能满足城市供水的需求,修建原水工程以合理调配区域内的原水资源就成了城市发展的必经之

路,城市原水系统也应运而生。城市原水系统指城市范围内未经过工艺处理的包含多种形式的天然水资源系统<sup>[1]</sup>,一般由4个子系统组成<sup>[2]</sup>:①水源子系统,主要包括水库、江河、湖泊、海洋等地表水源,潜水、泉水等地下水源;②取水子系统,即原水取水泵站;③输水子系统,主要包括输水管渠、输水河道、

提升泵站、调节池、调控阀门等构件；④需水子系统，包括水厂、工农业、生活、城市公用事业等原水用户。为了满足时代发展下的供水需求，城市原水系统逐步形成了由多水源、多类型、多输配水工程、多级提升设备构成的开放复杂系统<sup>[3]</sup>，与以水厂为源头的配水系统相互独立，具有随机性和周期性的特点<sup>[4]</sup>。目前国内外关于城市原水系统调度的研究较为丰富，已具备相对成熟的原水系统模拟软件，各类优化算法也广泛应用于解决大型城市原水系统调度问题，但准确地描述城市原水系统调度与传统水资源配置之间区别的文献却很少，也缺乏对近年来城市原水系统调度理论与实践发展的系统性总结。本文从城市原水系统调度的理论研究、软件开发和工程实践三方面对已有研究成果进行分析、归纳和总结，并指出今后的发展趋势。

## 1 城市原水系统调度的理论研究

城市原水系统是城市水资源系统的一部分，其结构如图1所示。对于城市原水系统调度的含义，不同阶段有不同的解释，但现在一般认为，城市原水系统调度是指根据城市居民生活、工业生产、农业、生态环境等调度需求，对城市原水系统中的各项工程设施和原水资源进行协调、优化和管理的过程。在城市原水系统调度的研究中常常出现与水资源配置和水库群调度概念区分不清的问题，但实际上城市原水系统调度在研究对象和研究目的上与这两者有着较大差别。水资源配置一般是指合理分配不同区域和用水户之间的水资源，以达到水资源可持续利用的目标<sup>[5]</sup>，广义上来说城市原水系统调度是水资源配置的一个重要组成部分。但在研究对象上，水资源配置主要以流域系统为对象，以流域水循环的物理过程为科学基础进行水资源总体规划<sup>[6]</sup>；城市原水系统调度则是在考虑流域水文特性的基础上，对水源单元（河流、湖泊、地下水等）、取水单元（取水泵站、引水工程等）、输水单元（管渠、河道等）做系统性分析，且就物理过程来说城市原水系统中各单元间不存在循环流<sup>[3]</sup>。在研究目的上，水资源配置是在水资源天然循环基础上，结合供用耗排人

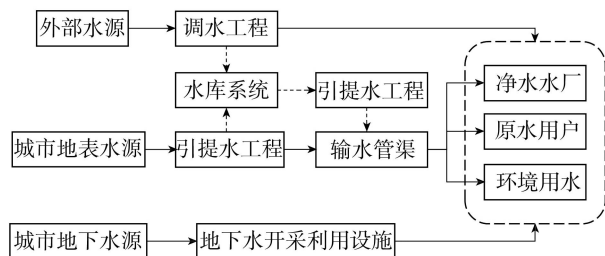


图1 城市原水系统的结构

工侧支循环来展开满足区域经济和生态环境要求的配置工作；城市原水系统调度则是以城市内的供水水质水量保障、节水节能减耗以及紧急事件处理和应对为目标展开原水调度工作。另一方面，水库群调度一般是指对多个水库进行协调管理，以最大限度地提高水资源利用效益的过程<sup>[7]</sup>。在研究对象上，水库群调度是以区域内多个水库及之间的水利工程为对象，研究其相互关系和影响，聚焦防洪、兴利和综合利用来研究上下游水库径流的水力联系和水库库容差异引起的防洪补偿<sup>[8]</sup>；城市原水系统调度则是将水库作为原水系统中的一个水力单元，弱化水库本身的防洪兴利功能。在研究目的上，水库群调度以水库群系统中的防洪、发电、灌溉、供水和生态等要素为具体目标；城市原水系统调度则是以需水子系统（用户）为主体提供满足供水保证、节能减耗、生态环保等要求的调度方案，并不考虑防洪、航运、输沙等目标。

城市原水系统调度的研究在国外始于20世纪70年代，而国内在21世纪初才将其从水资源配置的研究中独立出来。早期的原水调度以规则调度为主<sup>[9]</sup>，通过水务管理者的经验来制定调度方案，虽能解决相对简单的原水系统缺水问题，但无法胜任复杂原水系统的调度需要，存在发展瓶颈。此外，规则调度的调度过程对人员经验依赖程度高，调度决策的可靠性较差，不易于推广应用。随着计算机技术的发展，国内外对城市原水系统调度的研究过渡到以模拟调度和优化调度为主的科学调度阶段。其中模拟调度侧重于运用数理方法模拟物理化学过程，而优化调度则是在模拟调度的基础上，通过目标函数、约束条件、决策变量等实现大型城市原水系统调度问题的优化求解。城市原水系统优化调度的决策可靠性较强，优化调度方法能够推广应用于不同结构的原水系统，但近年来城市原水系统越来越趋于复杂，单纯基于需水预测的调度方案已不能满足调度运行的实际要求，因此能够实时监测和管理、定制化生成有时效性的调度方案的智能调度成了学者和水务公司广泛研究的对象。下面对城市原水系统的模拟调度、优化调度和智能调度的研究进程和研究方法做深入探讨，这3种调度理论在时间轴上有所交织，充分反映了具有时代特征的原水调度实践需求与科技发展趋势。

### 1.1 城市原水系统模拟调度

城市原水系统模拟调度从水动力学模型和水质模型出发进行系统建模，通过数理方法求解模型，并根据有限数目的调度运行方式给出调度策略。例如：Eker等<sup>[10-11]</sup>在考虑泵站扬程、管道摩擦损失和

局部损失等因素的情况下对包含梯级水库和提升泵站的供水系统建立模拟控制模型,对泵站流量、水库水头等进行非线性耦合,采用改进的二分法求解非线性摩擦系数方程,并通过设置液位控制器和 $H_w$ 鲁棒优化来提高系统运行的稳定性和鲁棒性;赵璧奎等<sup>[1,12-13]</sup>采用大系统分散控制方法将原水系统分解为多个独立控制单元,把水库、泵站等单元概化为水源节点,将定性控制技术引入基于水质迁移转化基本方程的水质水量耦合建模中,利用有向图遍历技术在时间和空间两个维度上求解模型,并运用决策树对调度策略进行分析;王如琦等<sup>[14]</sup>基于实测数据和地理信息数据,由达西公式和柯列勃洛克-魏特公式对原水系统建模,结合风险事故分析提出多水源条件下原水调配方案,并根据模拟结果给出调度策略。该研究在参数校核过程中发现原水输水管道中综合当量粗糙度不但与管道流量、流速相关,还与化学药剂浓度及温度等因素相关。模拟调度适用于探究城市原水系统特定的物理化学过程,还具备能在较小时间尺度上描述调度过程的优点。然而,当应对大型城市原水系统调度问题时,单纯通过模拟调度无法针对多样化的调度目标给出较优的调度策略,也难以处理随机性较强的原水调度问题,因此以科学的模拟调度为基础,优化城市原水系统调度决策逐渐成为研究的重点。

## 1.2 城市原水系统优化调度

针对城市原水系统的复杂性和随机性,国内外大部分城市原水系统调度研究均采用优化方法,其发展趋势为由小规模原水系统的单目标优化问题到大规模原水系统的多目标决策分析。早年学者们多针对由高地水库重力输水和低地水源泵站输水所组成的原水系统进行研究,例如:Joeres等<sup>[15-16]</sup>假设水库泄水量在某时段内是库存量的线性函数,构建了原水系统线性规划模型,利用机会约束线性决策规则选择出合适的操作策略,并通过仿真程序对其长期性能进行测试;Wu<sup>[17]</sup>在运筹学基础上分别建立了确定型和随机型线性规划模型来评估原水系统调度的经济性和可靠性,运用机会约束规划将约束条件与概率对应以研究调度运行的随机性,其主要优点是在给定概率分布函数的情况下,可将随机问题转化为等价的确定问题;Vieira等<sup>[18-19]</sup>从环保节能角度出发,在原水系统中引入包含风电能源的水电机组,从日尺度分析系统的最佳运行方式,以系统能源费用最低为目标,对常规泵站、水库构成的原水系统进行线性规划和非线性规划分析,对包含风电能源的供水系统分夏季和冬季进行非线性规划分析。

21世纪以来,由于计算机技术和启发式算法不

断完善,使用遗传算法、粒子群算法等启发式算法解决城市原水系统优化调度问题变得十分广泛,其中尤以遗传算法使用最多。例如:郭思元<sup>[3]</sup>采用系统分析方法对厦门市供水原水系统优化调度进行研究,从空间和时间两个维度对原水系统进行优化并提出原水系统中长期优化调度控制策略;郑飞飞等<sup>[2,20]</sup>将原水系统调度分为丰水期和枯水期,以总费用最小且水库补水量最大为目标,从时间序列上优化了原水系统补水过程;陈卫等<sup>[21-22]</sup>从多水源原水系统一级优化调度入手,研究了城市原水系统优化调度模型的建立和求解问题;陈卫等<sup>[21]</sup>选取供需压差、泵站电耗、制水成本和供需水量差等作为子目标函数,将多目标决策问题转化为单目标决策问题;陶涛等<sup>[22]</sup>针对珠海市分散复杂多水源原水系统河库并存、库库连通和汛期多雨水的特点,通过遗传算法求解以取水泵站能耗最小、水库运行末水位偏离水库控制水位最小为目标的一级优化调度模型。近年来,Luna等<sup>[23]</sup>考虑泵站状态、操作成本以及二氧化碳排放,利用遗传算法对日尺度泵站调度进行优化,并在算法种群中引入已知可行解和选择性突变机制等知识机制来提高算法的收敛性。除了采用遗传算法外,还有部分学者将粒子群算法应用于城市原水系统优化调度研究中。例如:Montalvo等<sup>[24]</sup>提出了一种自适应框架来提高粒子群优化算法的鲁棒性,算法的参数与粒子共同进化从而使参数的调整变得不再烦琐。需要指出的是,城市原水系统调度的复杂性往往伴随着优化目标的多样性,因此多目标优化问题的研究也十分重要。Carpitella等<sup>[25]</sup>提出了一种基于多准则的多目标优化问题研究方法,采用模糊优劣解距离法(fuzzy technique for order of preference by similarity to ideal solution,FTOPSIS)对非劣排序遗传算法II(non-dominated sorting genetic algorithm II,NSGA-II)找到的帕累托解进行排序,考虑了城市原水系统中泄漏问题的不确定性,得到不同情景下帕累托前沿的模糊解以确定水泵控制的最优决策方案。该方法不仅适用于解决城市原水系统的不确定性问题,也为解决城市原水系统的多目标问题提供思路。

在研究优化调度问题时,目标函数与约束条件的设立是优化过程的关键步骤,决策变量则是提出调度决策的基础。表1总结了当前国内外城市原水系统优化调度中的目标函数、约束条件和决策变量。由表1可知,城市原水系统优化调度的目标函数多以原水系统运行成本最小或部分子系统运行费用最小来建立。水量平衡、水位约束、库容约束是最基本的约束条件,但特定原水系统会根据具体情况由水



表 1 城市原水系统优化调度中的目标函数、约束条件和决策变量发展变化

| 研究者                      | 目标函数                                 | 约束条件  | 决策变量                                   |
|--------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Joeres 等 <sup>[15]</sup> | 在水库入流量为年平均入流量的条件下水泵抽水量最小             | 高低两个水库的库容约束;供水量大于等于需水量约束;初始时段约束;超过一半的时间从下部区域向上部区域输水,以使上部水源不会超负荷;水库抽水非负性约束;管道容量在低流量和平均流量下的约束 | 基于线性决策规则的水库放水水量                        |
| Little 等 <sup>[26]</sup> | 商业能源费用和备用发电机的成本最小                    | 用水需求约束;水库水位约束;水泵运行时间约束;原水抽水可行性约束  | 泵运行时间;水库库容;限制为 0/1 整数的决策变量             |
| 郑飞飞等 <sup>[20]</sup>     | 丰水期原水调度总费用(包括水资源费用、泵站电耗)最小           | 水库库容限制与水库流量守恒约束;水厂原水需求约束;泵站开机台数约束;泵站抽水量约束   | 第一阶段决策变量为水库各时段的补水量,第二阶段决策变量为各泵站机组的组合方式 |
| 张利娟 <sup>[27]</sup>      | 水库、河网向水厂供水时的运行费用最小                   | 水库可供水量约束;河道可供水量约束;水量供需平衡约束;非负约束   | 水库供水流量;河流翻水入库流量;河流抽水到水厂的流量             |
| 章燕喃等 <sup>[28]</sup>     | 供水系统缺水量和弃水量最小                        | 水量平衡约束  | 正常补偿区库容                                |
| Azmeri 等 <sup>[29]</sup> | 以运行中潜在的利益冲突最小化为目标,转化为原水和灌溉用水可靠性的偏差最小 | 水库库容约束;水库放水水量约束(满足河流、原水和灌溉的要求);下一年运行的月初水库水位应大于等于运行初期的水位                                     | 水库放水水量                                 |
| 王剑等 <sup>[30]</sup>      | 一级优化调度:原水系统总费用最小;二级优化调度:泵站总功率最小      | 一级优化调度:流量范围约束、总水量约束和清水池水位约束;二级优化调度:泵站水量和压力约束  | 泵站内各台泵开启状态和转速                          |
| Luna 等 <sup>[23]</sup>   | 泵在 24 h 内提供所需水的运行成本最小                | 水库水位约束;原水系统水力顺应性约束(主要为管道、泵站的压力限制)   | 在 24 h 内,每个泵每小时的开/关                    |
| 惠可文 <sup>[31]</sup>      | 水泵机组电耗值最小                            | 供水量约束;压力约束;调速比约束;高效约束   | 各水泵开/关                                 |

务公司建立更为细化的约束要求。决策变量以水库泄水量和泵站开关最常见,需在具体问题中进行设立。

### 1.3 城市原水系统智能调度

近年来,随着城市原水需水量预测方法趋于科学<sup>[32]</sup>和城市原水系统的规模不断扩大,传统的单一模拟调度和优化调度已无法满足原水调度的需求,因此,以大数据、物联网技术为基础的智能调度技术应运而生。智能调度是利用在线监测系统、决策支持系统、决策指挥系统所组成的技术框架<sup>[22]</sup>,辅以数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、地理信息系统(geographic information system, GIS)、动态仿真系统、专家系统和模糊理论等对城市原水系统从预测到监测到控制进行全方位调控,其中涵盖了城市用水预测、原水需水量预测、泵站和管线的监控及优化等多方面调度过程。张晔明<sup>[33]</sup>以青草沙、陈行和黄浦江这 3 个相对独立的水源地所形成的多水源原水系统为对象,从调度多级控制框架、调度系统硬件设计、调度功能设计、信息安全设计等层面探讨了城市原水系统智能调度的技术要点,提供了建立原水智能调度综合管理平台的思路。Pei 等<sup>[34]</sup>利用界壳理论和模糊集的相似性,探讨了成都城市原水安全应急救援方法,从压力和支撑两个维度构建了评价指标体系,提出了城市原水安全应急救援控制因素的确定原则,为城市原水系统智能调度技术中应急调度研究提供帮助。Zhang 等<sup>[35]</sup>采用 BP(back propagation)神经网络

支持向量回归技术(support vector regression, SVR)和长短期记忆模型(long short-term memory, LSTM)3 种人工智能模型,利用 1982—2015 年的水库运行历史记录,在月、日、小时 3 个时间尺度上模拟水库运行,给城市原水系统智能调度提供了算法支持,改善了调度准确性。

受经济效益驱动,原水智能调度技术与原水公司关系紧密,大量应用情景和前沿信息来源于原水公司的原水工程建设,如上海城投原水有限公司提出了水量预测、原水预警、泵组寻优、机泵控制的原水智能调度框架<sup>[36]</sup>。自 2020 年全球疫情爆发后,原水调度领域内在线检测与调控技术的应用发展迅速,以青草沙原水厂为代表的原水公司采用在线监测为主、辅以人工比对的方式,对监测点位的水质指标进行检测化验,并根据上游来水特点对水库的藻类、臭味等指标进行重点监测,定期将各项水质情况上报至供水管理部门和生态环境部门,确保总氯、粪大肠菌、生物毒性等各项常规水质指标达标。此外,一些原水公司利用城市原水智能调度技术建立了流域协同保障工作机制,第一时间接收水文水情预警以及闸泵运行工况信息,第一时间告知下游水厂浊度、藻类、pH 值、有机物含量、加药调整等水质信息,及时有效地互通各水源地的水量水质监测及管理情况。

## 2 城市原水系统调度软件开发

城市原水调度的理论研究与调度软件开发息息

相关,仿真软件、机器学习是模拟调度、优化调度和智能调度最有效的计算工具,城市原水调度研究中常用的仿真软件有 EPANET、Infoworks WS Pro、Infoworks ICM 等,其计算机制和特点各不相同。此外,城市原水系统智能调度需要科学统筹全局的取用水,云计算、大数据、物联网等技术的快速发展,为原水的智慧化运营提供了理论和技术支撑,现阶段原水供应的调度方式以人工经验方法进行生产调度管理,导致运行效率低,运营成本高,预警监测大多由人工完成,对异常情况反应力极低,极大影响生产,因此开发以决策支持系统为主的城市原水系统调度软件就显得十分重要。

## 2.1 城市原水系统的仿真软件

城市原水系统调度研究中的仿真软件以美国环保署开发的开源供水管网模拟软件 EPANET 最为常见。EPANET 应用广泛,且适用于线性规划和非线性规划问题的求解。Vieira 等<sup>[18]</sup>将优化模型中的优化规则直接在 EPANET 软件中实现,并以 EPANET 为基础开发了一个集成的软件工具以评估优化结果。纪昌明等<sup>[37]</sup>在 Visual Studio 2008 环境下将 MapX 控件与 SQL Server 2000 数据库相整合,开发了深圳市原水调度系统的 GIS 实时监控图功能模块,该模块可实现鹰眼导航、专题地图、交互查询和无级漫游等可视化功能,使原水系统调度仿真更加直观,也增强了仿真软件的数据更新和空间分析能力。赵璧奎等<sup>[38]</sup>通过对原水系统进行概念化分析提出由点、线、面基本元素构成的原水系统概念化模型,针对原水系统拓扑结构的动态存储、拓扑关系还原、优化模拟和接口函数扩展设计等关键问题,运用面向对象技术设计开发了深圳市原水系统调度管理系统仿真模型库及用户交互界面。王如琦等<sup>[14,39]</sup>将 Infoworks WS Pro 和 Infoworks ICM 这两种软件引入城市原水系统的研究中,用于模拟上海城市原水系统,比较这两种软件在模拟大型城市原水系统的优劣;通过采用两种软件的不同糙率模型,对不同坡度及管底标高的微观模型进行测试,结果表明对于无精细管道数据的原水系统,推荐采用 WS Pro 模型的 CW 糙率模型,对于有详细管网数据的原水系统,推荐采用 ICM 的 N 糙率模型。综上所述,虽然城市原水系统调度研究中以 EPANET 居多,但水力仿真软件并不局限于此。

## 2.2 城市原水调度的决策支持系统

随着城市原水系统的仿真软件逐渐完善,原水调度领域内决策支持系统也得到广泛应用。Palmer 等<sup>[40]</sup>开发了一个用于协助干旱决策的决策支持系统,集成了专家系统、线性规划模型、数据库管理工具和计算机图形学等多种编程技术,并根据西雅图

水务局管理人员的运营经验构建专家系统的规则库;该决策支持系统的线性规划模型可以确定 1987 年西雅图旱灾条件下原水系统的水量情况和最优调度策略,但无法为未来发生的干旱事件提供决策。Wang 等<sup>[41]</sup>设计了基于水力模型的应急调度决策支持系统,用以消除多水源原水系统上游突发污染事件的影响;该决策支持系统包括水质预测、系统安全评估、应急策略推理和调度优化 4 个功能模块;其工作流程是先在给定污染信息的条件下,计算特定截面上的水质变化,然后利用第一个模块的输出对当前系统的安全性进行综合评估,同时考虑到污染的影响和系统容量,当污染严重影响系统可靠性时,采用基于模糊逻辑的推理模块生成包括技术措施在内的合理策略。原水调度决策支持系统的研究为原水智能调度提供了软件支撑,而想要进一步丰富城市原水系统调度软件的功能模块,则离不开仿真软件、决策支持系统、SCADA、GIS 的集成应用<sup>[33]</sup>。

## 3 城市原水系统调度工程实践案例

### 3.1 上海市原水系统调度工程

上海城市原水系统规模庞大,共有四大子原水系统<sup>[42]</sup>:黄浦江上游金泽原水系统、长江青草沙原水系统、长江陈行原水系统以及长江东风西沙原水系统。朱雪明等<sup>[43]</sup>以科学调度、安全输水为基本点,系统地考虑了青草沙水源地原水工程的特点以及调度所涉及各类因素,建立了由 SCADA、GIS、动态仿真和水力学模型系统、决策支持与专家调度系统、调度运行管理系统、生产调度视频系统、语音调度系统、全球广域网等组成的一体化信息管理平台,可实现调度的科学性、预测性和时效性,达到在满足社会需求前提下,合理利用水资源、减少能耗、降低输水成本的目的。张晔明<sup>[33]</sup>所介绍的上海市中心城区原水供应调度系统在通过了调试切换、调度运行、保高峰、抗咸潮等工况的考验后形成了“两江并举、多源互补”的供应格局,青草沙、黄浦江、陈行三大子原水系统的服务压力合格率可达 99.53%,其中严桥支线、凌桥支线的电基数较原计算运行电基数大幅下降。Huang 等<sup>[44]</sup>针对上海金山-黄浦江原水工程,基于流体力学建立了泵站优化运行的计算模型,模型中考虑了泵站运行方式和初始水位下的清水箱对泵站耗电量的影响,利用该优化计算模型,可以保证在泵机组能量充能大大降低的情况下,满足泵送能力相同的运行需求,达到节能的目的;同时使用变速泵可以降低水泵机组的用电消耗,较大提高抽水站运行经济性。

### 3.2 珠海市原水系统调度工程

夏禹等<sup>[45]</sup>以珠海市原水系统为研究对象,通过



EPANET 建立珠海原水系统水力微观模型,分析原水系统中水库的实际应急能力和不同工况下主力取水泵站的最大取水能力,并对可能的突发情况进行分类,然后从调度的角度针对不同的突发事件制定了应急预案,提高了调度预案的可操作性和准确性,同时也能帮助调度人员及时了解应急状态下整个原水系统现状,为调度者的决策提供理论依据。Wang 等<sup>[41]</sup>设计了基于水力模型的应急调度决策支持系统,以珠海市这一南方沿海城市的咸潮期为例,验证了该系统的可行性;通过情景分析,证明了该决策支持系统工具有助于水务公司快速有效地应对突发污染事件的应急调度。综上,对于以珠海原水系统为代表的城市原水系统应急调度问题,构建应急调度预案库是最常见的解决途径,决策支持系统在应急调度中的应用前景十分广阔,将会成为未来研究的热点。

### 3.3 国外城市原水系统调度工程

以美国为代表的发达国家对于城市原水系统调度的研究起步较早,在 20 世纪末便有了相对成熟的原水调度理论,建设了大量的原水调度工程,但其工程规模并不庞大。如美国马里兰州的巴尔的摩原水系统<sup>[15-16]</sup>和华盛顿州的西雅图原水系统<sup>[40]</sup>,均是由若干不同高程的水库和流域水源构成的原水系统,其调度工程规模小且受流域水文因素影响较大,其调度成效也受气候和鱼类活动限制。由于 20 世纪机器学习的应用并不广泛,调度工程中决策规划是暂时制定的,所有机构只能获得数量有限的的数据;此外,发达国家的资本主义制度特点导致水务领域各机构相互制衡的现象比较严重,决策的确切影响往往不为人知。而近 10 年美国逐渐将城市饮用水保护工作的重点由水厂扩展至水源地<sup>[42]</sup>,如美国纽约市已发展为一个多水源地城市,纽约原水调度工程规模相对较大、调节能力强,这不仅依托于智能调度技术,也得益于其长期建造的完整备用供水设施。国际上一些中小国家的城市原水系统调度工程侧重于对水泵或水库的单一控制优化,其原因可能是城市规模小,原水系统复杂程度低,针对单一水力要素优化的效益也较为显著。如 Eker 等<sup>[10]</sup>对土耳其加济安泰普原水调度工程水泵机组采用最优鲁棒控制法对输水进行控制,有效改善了供水运行。Oh 等<sup>[46]</sup>在韩国城镇原水调度工程中,利用水温传感器和实时水泵效率监测优化水泵调度,来减少碳排放和能源消耗。Kowalik 等<sup>[47]</sup>在波兰城镇原水调度工程中,将二元线性规划应用在水泵调度上,基本达到了电力成本最小化目标。

## 4 研究展望

原水系统人工调度这一传统调度方式虽能一定

程度上满足小型城市的供水需求,但在原水系统趋于复杂的今天已难以在保证水质水量的前提下控制供水成本并评估运行风险。以目前城市原水系统调度理论研究、软件开发为基础,对工程案例作出具体分析,可以预见未来的研究方向主要有 4 个方面:

a. 加强城市原水系统智能调度理论研究,构建适用面广、可操作性强的城市原水智能调度系统。开展城市原水系统一体化智能调度模型研究,整合 SCADA、GIS、物联网等监测技术构建智能监测模块,整合仿真软件、拓扑结构动态存储、拓扑关系还原、水力水质耦合计算等仿真技术构建动态仿真模块,整合机器学习、优化算法、专家系统等调度方法构建实时调度模块。建立集成式的城市原水智能调度系统,实现对原水供应的全面监控和管理,降低供水成本与风险。

b. 提高城市原水系统调度目标的预测精度与时效性。采用先进的数据采集技术获取多维数据,自动化识别数据异常和系统故障维护,提高预测准确性。采用改进的人工智能算法优化预测模型,提高预测精度和鲁棒性。利用大数据技术实时处理原水系统数据并应用于调度决策,以确保时效性。

c. 建立科学的城市原水系统应急调度预案库。利用系统建模和仿真技术,模拟城市原水系统可能遇到的事故情景,评估系统的应急响应能力,并根据结果优化应急预案,同时也需考虑研究法律和社会因素。在原水调度工程实践环节通过虚拟现实(VR)或增强现实(AR)、数字孪生技术提高应急人员培训效果。

d. 形成满足生态与发展需求的城市原水系统调度评价体系。研究不同调度方式对河流生态系统的影响,开发评价模型量化经济效益与生态保护的权重,研究生态环境的潜在风险,并形成可持续性调度指标,建立城市原水系统调度综合评价体系。

### 参考文献:

- [1] 赵壁奎. 城市原水系统水质水量联合调度优化方法及应用研究[D]. 保定:华北电力大学,2013.
- [2] 郑飞飞. 珠海城市原水系统优化调度技术研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [3] 郭思元. 城市供水原水系统优化调度理论及应用研究[D]. 上海:同济大学,2005.
- [4] 刘峰. 原水调度系统软件设计与应用研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [5] 王浩,游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报,2008,39(10):1168-1175. (WANG Hao, YOU Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(10):1168-1175. (in Chinese))
- [6] 王浩,秦大庸,王建华. 流域水资源规划的系统观与方

- 法论[J]. 水利学报,2002,33(8):1-6. (WANG Hao, QIN Dayong, WANG Jianhua. Concept of system and methodology for river basin water resources programming [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(8):1-6. (in Chinese))
- [7] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展,2010,21(4):496-503. (GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems[J]. Advances in Water Science,2010,21(4):496-503. (in Chinese))
- [8] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报,2019,50(1):25-37. (WANG Hao, WANG Xu, LEI Xiaohui, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):25-37. (in Chinese))
- [9] 邵惠君. 黄浦江原水系统调度工作的分析[J]. 城市公用事业,2002(1):18-20. (SHAO Huijun. Analysis on the operation of Huangpu River raw water system [J]. Communication & Shipping,2002(1):18-20. (in Chinese))
- [10] EKER I, GRIMBLE M J, KARA T. Operation and simulation of city of Gaziantep water supply system in Turkey[J]. Renewable Energy,2003,28(6):901-916.
- [11] EKER I, KARA T. Operation and control of a water supply system[J]. ISA Transactions,2003,42(3):461-473.
- [12] 赵璧奎,王丽萍,张验科,等. 城市原水系统水质水量控制耦合模型研究[J]. 水利学报,2012,43(11):1373-1380. (ZHAO Bikui, WANG Liping, ZHANG Yanke, et al. Study on the coupling model for water quality and quantity control in the urban raw water system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(11):1373-1380. (in Chinese))
- [13] 赵璧奎,王丽萍,张验科,等. 大型城市原水系统水库水质模型及应用[J]. 水电能源科学,2013,31(2):43-46. (ZHAO Bikui, WANG Liping, ZHANG Yanke, et al. Study on reservoir water quality model of large scale urban raw water system and its application[J]. Water Resources and Power,2013,31(2):43-46. (in Chinese))
- [14] 王如琦,张新,鲁宇闻. 上海城市多水源条件下原水调配关键技术研究[J]. 给水排水,2016,52(12):9-15. (WANG Ruqi, ZHANG Xin, LU Yuwen. Study on raw water scheduling with multiple water sources in Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering,2016,52(12):9-15. (in Chinese))
- [15] JOERES E F, LIEBMAN J C, REVELLE C S. Operating rules for joint operation of raw water sources[J]. Water Resources Research,1971,7(2):225-235.
- [16] JOERES E F, SEUS G, ENGELMANN H M. The linear decision rule (LDR) reservoir problem with correlated inflows; 1. model development [J]. Water Resources Research,1981,17(1):18-24.
- [17] WU M. The study on systems analysis of multiple raw water sources operation [J]. Water Resources Management II,2003,61:10.
- [18] VIEIRA F, RAMOS H M. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: a case study[J]. Energy Policy,2008,36(11):4142-4148.
- [19] VIEIRA F, RAMOS H M. Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems[J]. Renewable Energy,2009,34(3):928-936.
- [20] 郑鹏飞,刘遂庆,陶涛. 多水源原水系统丰水期优化调度模型研究[J]. 河南科学,2008(10):1246-1249. (ZHENG Feifei, LIU Suiqing, TAO Tao. Optimal operation of raw water system including multi-sources in abundant water period[J]. Henan Science,2008(10):1246-1249. (in Chinese))
- [21] 陈卫,陆健,吴志成,等. 城市多水源供水系统一级优化调度模型及求解[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(2):129-132. (CHEN Wei, LU Jian, WU Zhicheng, et al. First-class optimal scheduling model and evaluation of urban multi-source water supply systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2009,37(2):129-132. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] LUNA T, RIBAU J, FIGUEIREDO D, et al. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization [J]. Journal of Cleaner Production,2019,213:342-356.
- [24] MONTALVO I, IZQUIERDO J, PEREZ-GARCIA R, et al. Improved performance of PSO with self-adaptive parameters for computing the optimal design of water supply systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2010,23(5):727-735.
- [25] CARPITELLA S, BRENTAN B, MONTALVO I, et al. Multi-criteria analysis applied to multi-objective optimal pump scheduling in water systems [J]. Water Supply,2019,19(8):2338-2346.
- [26] LITTLE K W, MCCRODDEN B J. Minimization of raw water pumping costs using MILP [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1989,115(4):511-522.
- [27] 张利娟. 舟山本岛供水系统原水优化调度研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [28] 章燕喃,田富强,胡宏昌,等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报,2014,45

- (7): 844-849. (ZHANG Yannan, TIAN Fuqiang, HU Hongchang, et al. Joint operation model of multiple water sources in Beijing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 844-849. (in Chinese))
- [29] AZMERI A, HADIHARDAJA I K, SHASKIA N, et al. Completion of potential conflicts of interest through optimization of Rukoh Reservoir operation in Pidie District, Aceh Province, Indonesia [J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1903(1): 1-9.
- [30] 王剑, 许亚群, 张珏靓. 宜兴市多水源原水系统优化调度[J]. 净水技术, 2018, 37(增刊1): 1-3. (WANG Jian, XU Yaqun, ZHANG Jueliang. Optimized operation of multi-source raw water system in Yixing City [J]. Water Purification Technology, 2018, 37 (Sup1): 1-3. (in Chinese))
- [31] 惠可文. 大变幅水位取水泵站优化设计及节能运行研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [32] 罗华毅, 王景成, 杨丽雯, 等. 基于时差系数的城市原水需水量预测应用[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(10): 1260-1267. (LUO Huayi, WANG Jingcheng, YANG Liwen, et al. Research and application of urban water demand forecasting based on time difference coefficient [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(10): 1260-1267. (in Chinese))
- [33] 张黎明. 超大型多水源原水输水工程调度系统的设计及探讨[J]. 给水排水, 2014, 50(8): 120-125. (ZHANG Yeming. Design and probe into the adjusting system for the extra-large multi-water source raw water transmission project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50(8): 120-125. (in Chinese))
- [34] PEI W, LI Y. Emergency rescue methods of urban raw water safety based on periphery model of raw water system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295-298: 568-580.
- [35] ZHANG D, LIN J, PENG Q, et al. Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 720-736.
- [36] 匡海鹰, 曹丽华, 张淑敏. 原水智能调度系统的建设与应用[J]. 化工管理, 2020(23): 112-113. (KUANG Haiying, CAO Lihua, ZHANG Shumin. Construction and application of raw water intelligent dispatching system [J]. Chemical Management, 2020(23): 112-113. (in Chinese))
- [37] 纪昌明, 蒋志强, 赵璧奎, 等. MapX 在城市原水调度系统中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2012(11): 132-135. (JI Changming, JIANG Zhiqiang, ZHAO Bikui, et al. The application of MapX in city raw water dispatching system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(11): 132-135. (in Chinese))
- [38] 赵璧奎, 王丽萍, 李克飞, 等. 城市原水系统计算机仿真模型设计[J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 74-78. (ZHAO Bikui, WANG Liping, LI Kefei, et al. Computer simulation model design for urban raw water systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(1): 74-78. (in Chinese))
- [39] 张芹藻, 王如琦. 水力模型在上海城市原水系统的实践与应用[J]. 净水技术, 2020, 39(1): 69-74. (ZHANG Qinzao, WANG Ruqi. Application and practice of hydraulic model in Shanghai urban raw water conveyance system [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(1): 69-74. (in Chinese))
- [40] PALMER R N, HOLMES K J. Operational guidance during droughts; expert system approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(6): 647-666.
- [41] WANG Q, LIU S, LIU W, et al. Decision support system for emergency scheduling of raw water supply systems with multiple sources [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 777-786.
- [42] 于大海. 上海原水系统现状及发展规划[J]. 水资源开发与与管理, 2022, 8(4): 15-23. (YU Dahai. Present situation and development planning of raw watersystem in Shanghai [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(4): 15-23. (in Chinese))
- [43] 朱雪明, 黄澄, 徐振强. 青草沙水源地原水工程调度系统总体设计综述[J]. 给水排水, 2009, 45(11): 56-62. (ZHU Xueming, HUANG Cheng, XU Zhenqiang. Summary of the overall design of raw water engineering dispatching system in Qingcaosha water source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(11): 56-62. (in Chinese))
- [44] HUANG S, WANG F, XU H, et al. Research on optimal operation of raw water pumping system based on hydromechanics in waterworks [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 327: 294-300.
- [45] 夏禹, 陶涛, 方晔, 等. 珠海市原水系统应急调度研究[J]. 河南科学, 2010, 28(10): 1295-1299. (XIA Yu, TAO Tao, FANG Ye, et al. Study of Zhuhai raw water system emergency operation [J]. Henan Science, 2010, 28(10): 1295-1299. (in Chinese))
- [46] OH H, EOM J, KIM T. Case study of pump scheduling using sensor-based real-time pump efficiency monitoring [J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 181: 141-150.
- [47] KOWALIK P, RZEMIENIAK M. Binary linear programming as a tool of cost optimization for a water supply operator [J]. Sustainability, 2021, 13(6): 13063470.

(收稿日期: 2023-02-24 编辑: 雷燕)