

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.018

基于模型驱动实现水厂生产智能调度管理

李柱¹, 杨澜¹, 钱刚²

(1. 上海城投水务(集团)有限公司 制水分公司, 上海 200086; 2. 上海西派埃智能化系统有限公司, 上海 200233)

摘要: 在智慧水务理念引导下,上海某传统制水厂已开启数字化转型步伐。水量调度是制水厂生产运行的重要业务之一,通常由经验丰富的工作人员完成。将工作人员的经验凝练为水量模型,用模型调度代替人工调度,成功实现了水厂水量调度无人化。水量模型以人工智能、大数据分析等新兴技术为基础进行构建,包含了供水量分析、泵组优选等多个数学模型。水量模型上线运行后,调度指令准确执行率达到95%以上。该水厂在生产水量增加8.66%的基础上,出水用电单耗下降了5.8%。

关键词: 水量模型; 智能调度; 智慧水厂; 泵组优选

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0106-05

Implementation of Intelligent Scheduling in Waterworks Based on Model-driven

LI Zhu¹, YANG Lan¹, QIAN Gang²

(1. Water Production Branch, Shanghai Chengtou Water Group Co. Ltd., Shanghai 200086, China;
2. Shanghai SIPAI Intelligent Systems Co. Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: With the concept of “smart water”, a traditional waterworks in Shanghai have started the pace of digital transformation. Water quantity scheduling is one of the most important operations in waterworks, which is usually completed by experienced staff. The experience of the staff was condensed into a water quantity model, and the model scheduling was used instead of manual scheduling, which successfully realized the unmanned water quantity scheduling in the waterworks. The water quantity model is built on the basis of artificial intelligence, big data analysis and other emerging technologies, including multiple mathematical models such as water supply analysis model and pump group optimization model. After the water quantity model was put online, the accurate execution rate of the scheduling instruction reached more than 95%. With the increase of water production volume by 8.66%, the electricity consumption of water outlet decreased by 5.8%.

Key words: water quantity model; intelligent scheduling; smart waterworks; pump group optimization

水厂的水量调度通常包括进出水量调整、机泵搭配、水库液位调整等。目前,传统水厂多依靠工作人员的主观经验进行决策,即人工经验调度^[1]。随着数字化技术普及,人工经验有机会凝练成数学模型,以打破固有思维,寻找调度新模式,有效挖掘水

量调度机理并节省人力,形成数字化管理模式^[2-3]。因此,本研究基于上海某水厂现状实际工况,拟利用新一代信息技术,结合流体力学相关理论,建立供水量分析模型、泵组优选模型等,以实现生产智能调度无人化,提升运行智能化水平和安全可靠性。

1 研究方法

1.1 供水量分析模型

该水厂设计供水能力为 $70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 日均供水量约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。常规水处理工艺包含混凝、沉淀、过滤、消毒4个环节。深度处理工艺是在常规工艺的基础上新增臭氧生物活性炭联用工艺, 进一步降解水中的有机物、氨氮、臭味物质等。该水厂供水系统共设3根出水管, 出水泵房设有5台变频水泵(额定流量 $7\,750 \text{ m}^3/\text{h}$, 额定扬程 380 kPa , 配套电机 $1\,120 \text{ kW}$)及5台定频泵(额定流量 $4\,050 \text{ m}^3/\text{h}$, 额定扬程 380 kPa , 轴功率 630 kW)。变频泵为水量、水压调节增加了便利性。为保障供水管网压力动态平衡及供水的稳定性, 拟通过模糊控制方法建立供水管网压力与流量之间的关系模型(即供水量分析模型), 进而根据供水管网压力需求实时计算水厂出水流量值, 以此满足用户端的稳定压力和充足的水量。以水厂实际运行过程中调度压力目标值与出厂管压力实测值之间的差值及差值变化率、当前实测供水流量等数据为基础, 通过模糊控制规则计算水厂所需目标出水流量(见图1)。



图1 目标出水流量模糊控制原理

Fig.1 Fuzzy control schematic of target water flow

采用上述方法对水厂实际历史运行数据进行分析, 结果如图2所示。由图2可知, 模糊控制算法预测水厂出厂管流量与实测流量吻合, 误差为 $1.96\% \sim 2.07\%$, 证明该方法预测的准确性较高, 可用于水厂实际生产。

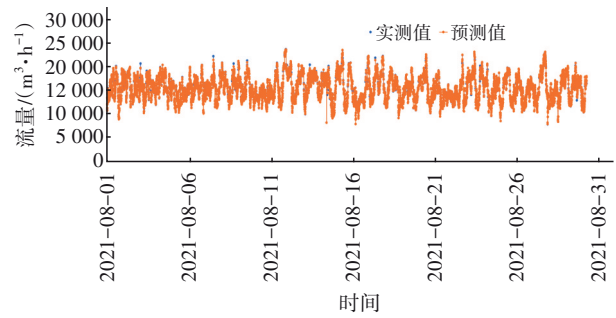


图2 模糊控制方法预测流量变化

Fig.2 Fuzzy control method to predict flow variation

1.2 制水量优化分配模型

为使出水泵房泵组运行效率最优, 需在不同供水量需求条件下对运行台数和频率进行优化^[4-5]。通过调整并联运行水泵的台数结合变频调速技术可获得不同供水量条件下的最优运行方案, 既要确定最优运行机组台数, 又要确定其运行频率, 既有连续变量, 又有离散变量。因此, 将机理模型和数理模型相结合, 充分考虑清水库及吸水井液位建立出水泵房泵组优化模型, 深入研究出水泵房内最优工作水泵台数和频率, 以确定机泵的最优运行方式。

1.2.1 泵组优选机理模型

泵组的优选机理模型按照水泵的特性曲线和泵前后的管道阻力曲线两方面进行分析, 选择的目标函数为单位配水电耗达到最优, 从而实现了泵组最优搭配的模型, 以多目标优化算法进行计算, 对泵组组合变频泵的频率进行了优先满足筛选。

1.2.1.1 建立泵组优化问题数学模型

在满足所需要求流量和扬程的前提下, 建立以水泵机组的配水单位电耗(J)最小为目标的优化问题的数学模型, 见下式:

$$J = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^m w_i N_i + \sum_{j=1}^n w_j N_j}{P \times Q_t} \right) = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^m w_i (d_{0i} + d_{1i} Q_i + d_{2i} Q_i^2) + \sum_{j=1}^n w_j (d_{0j} S_j^3 + d_{1j} S_j^2 Q_j + d_{2j} S_j Q_j^2)}{P \times Q_t} \right) \quad (1)$$

式中: m 为工频泵运行台数; n 为变频泵运行台数; w 为泵的运行信号, 取值为0或1, $w=0$ 时不运行, $w=1$ 时运行; S 为转速比; N 为每台泵功率; Q_t 为清水泵房出水总流量; Q_i 为工频泵单泵流量; Q_j 为变频泵单泵流量; d_0, d_1, d_2 分别为泵组特性曲线回归系数。

约束条件:

$$\textcircled{1} \text{ 水量 } Q_t, Q_t = \sum_{i=1}^m Q_i + \sum_{j=1}^n Q_j$$

$$\textcircled{2} \text{ 扬程 } H: H=f(P), P \text{ 为压力, 计算式如下:}$$

$$H = (H_{\text{后}} - H_{\text{前}}) + \left(\frac{P_{\text{后}}}{\rho g} - \frac{P_{\text{前}}}{\rho g} \right) + \left(\frac{v_{\text{后}}^2}{2g} - \frac{v_{\text{前}}^2}{2g} \right) + h_w \quad (2)$$

式中: $H_{\text{后}}, H_{\text{前}}$ 分别为泵后、泵前压力表高程, m ;

$P_{\text{后}}$ 、 $P_{\text{前}}$ 分别为泵后、泵前压力表所测压力, kPa; $v_{\text{后}}$ 、 $v_{\text{前}}$ 分别为泵后、泵前管路内流速, m/s; h_w 为管路损失, m; ρ 为介质密度, kg/m³; g 为重力加速度, 一般取 9.8 m/s²。

③ 转速比: $S=[S_{\min}, 1]$, 高效区: $Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}$, $Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}$ 和 Q_{\max} 分别为各泵高效区边界上的流量最小值和最大值, m³/s。

④ 供电模式确保两路均衡。

⑤ 机泵启停符合要求。

⑥ 根据吸水井灵活搭配选泵。

⑦ 变频泵与工频泵选择规则。

常用约束条件为①~④, 特殊约束条件为⑤~⑦, 其求解变量为 w 和 S 。

1.2.1.2 求解泵组优化问题模型

为了更好地实现泵组优化模型上存在的非线性规划问题, 采用遗传算法对其进行求解。

① 参数编码

第一步确定问题的目标函数和带求解的变量, 然后对变量进行编码。本研究使用二进制编码, 水厂出水泵房共 10 台泵, 编码长度为 10 位; 对于运行信号 w , 1 代表运行, 0 代表不运行, 对于转速比 $S=[0.7, 1]$ (机泵频率 $F=[35, 50]$ Hz); 编码长度 $l=8$, 即 $S_{\min}=0000\ 0000 \rightarrow 0.7$, $S_{\max}=1111\ 1111 \rightarrow 1$, 其编码精度 $\delta = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2^l - 1} = 0.001\ 176\ 47$ (约为 0.058 Hz)。因此, 上述问题编码总长度为 18。

② 初始种群生成

为提高遗传算法的计算速度, 确保机泵选择敏捷, 初始化种群尽可能分布在最优值附近的区间。根据变频泵的特性曲线, 对于不同的扬程, 对转速比 S 划分了不同的初始化区间, 具体见表 1。

表 1 变频泵的扬程、转速比和频率参数

Tab.1 Variable frequency pump head, speed ratio and frequency parameters

扬程/kPa	转速比	频率/Hz
81.1~180.6	0.7~0.89	35~44.5
180.6~212	0.7~0.97	35~48.5
212~282.2	0.7~1	35~50
282.2~321.1	0.75~1	37.5~50
321.1~362.5	0.8~1	40~50
362.5~406.4	0.85~1	42.5~50
406.4~452.8	0.9~1	45~50
>452.8	0.95~1	47.5~50

③ 个体适应度评估

考虑到优化问题是非线性多约束的数学模型, 通过罚函数的方法转换为无约束条件, 具体罚函数包括: P_1 , 总流量超过或低于流量控制区间; P_2 , 单泵流量偏离了限定区间; P_3 , 出现了单路供电负载模式; P_4 , 机泵开停不符合规定; P_5 , 泵开停不符合吸水井要求; P_6 , 未开变频泵; P_7 , 工频泵参与了运行, 故构造适应度函数: $\text{eval}(x) = J'(\max) - J'(x)$ 。

④ 选择、交叉、变异

选择环节采用轮盘赌方法, 即生成 0~1 之间的随机数与每个个体遗传到下一代群体的概率进行匹配, 确定个体是否顺利遗传到下一代群体; 而交叉操作是按照一定的交叉概率在匹配库中随机选取 2 个个体进行交叉操作, 交叉概率设为 0.6~0.9, 其交叉位置随机; 变异是以很小的概率随机地改变种群中单个个体的某些基因值。

1.2.2 泵组优选数理模型

泵组优选数理模型采用大数据分析, 从近年机泵运行数据库中优选泵组搭配方案。以泵组 (单台泵或多台泵同时工作) 运行效率最高/配水单位能耗最低为目标, 选择能耗较低的泵启停台数和工作频率 (变频泵) 方案, 实现对机泵的控制, 确保水厂泵组高效、优化、自动运行 (见图 3)。

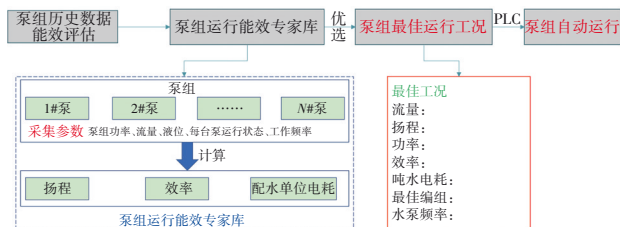


图 3 基于大数据分析的泵组优选过程

Fig.3 Optimization process of pump group based on big data analysis

具体实现过程:

① 基于水厂 2019 年 8 月—2020 年 8 月泵组历史运行数据及泵组能效计算结果, 建立泵组运行能效专家库, 专家库参数包含: 水库液位、出水流量、压力、泵组组合、效率、配水单位电耗及各泵运行信号。

② 根据实际调度压力、出水流量和液位, 以运行效率最高/配水单位电耗最低为目标, 以泵运行能效专家库数据为依据, 优选最优的机泵组合。在泵组优选过程中, 同时考虑泵组优选机理模型对应

的⑤~⑨约束条件,以使优选泵组满足水厂现场应用场景。

③ 将优选结果的指令通过通信传达至泵组控制模块,对机泵的启停和变频调节进行控制。泵组实际运行过程中,若发现泵组组合效率降低,可以实现自动泵组切换,确保机泵处于高效运行段。

1.3 模型联用

首先利用供水量分析模型将调度压力指令值中的压力数据转换为水量数据,再将压力数据和水量数据输入泵组优选模型中。泵组优选机理模型和泵组优选数理模型分别采用遗传算法和大数据分析原理,分别计算得出2个配水方案,方案中包括机泵启停数量、各泵运行信号、机泵运行频率、水库液位预测值、生产线水量分配等,配水方案的优选以稳态和能效两种模式来确定,并自动下发至PLC程序端进行自动执行和监听设备调节过程,从而实现模型驱动生产的技术运用。

2 应用实践

2.1 水量模型与数字孪生仿真平台相融合

采用BIM+Unity 3D方式1:1构建了与现实水厂“虚实互生”的数字孪生水厂,数字孪生水厂以三维形式展示各个构筑物,并实时展示水质、水量数据,工作人员可于办公室内掌握重要的生产运行数据,无需通过现场获得。在此数字孪生水厂的基础上构建了水厂数字孪生与仿真平台,包括运行监视、安全管控、调度仿真、应急预案仿真等多个功能板块。本研究将水量模型融入调度仿真功能板块,可实现对模型的监听、控制和评价功能。

水量模型运行有2种模式:一是在线模式,实时接收调度指令,模型计算,下发配水方案,PLC系统自动执行;二是离线模式,用于运行工程师尝试、学习配水技巧及演练应急场景。水量模型的应用分为稳态和能效两种模式,稳态模式是发挥清水库的调蓄作用,保持生产线水量平稳,能效模式是保持清水库的高水平液位,使得出水泵尽可能降低能耗。模型的计算结果会展示完整的配水方案,包括进出厂水量、各生产线的水量分配、机泵搭配、泵组效率以及液位预测等。

2.2 水量模型使用成效

2.2.1 计算结果可靠

为验证模型计算结果的准确性,进行了水库液位预测验证和机泵搭配预测验证。考虑到不影响

水厂正常运行生产,验证阶段由测试人员设计不同的方案,通过水平衡系统模拟模型进行计算,再根据计算结果由中控室人员在上位机人工调整各生产线进水量,与此同时记录实时的水库液位变化、机泵效率等参数,并与模型计算结果进行对比。采用水平衡系统模拟模型应用过程中,需根据现场工艺运行参数变化实时启动模型进行计算,以确保模型预测结果的准确性,当现场工艺运行条件变化时,可自动启动模型进行计算。目标液位和实测液位变化见图4。

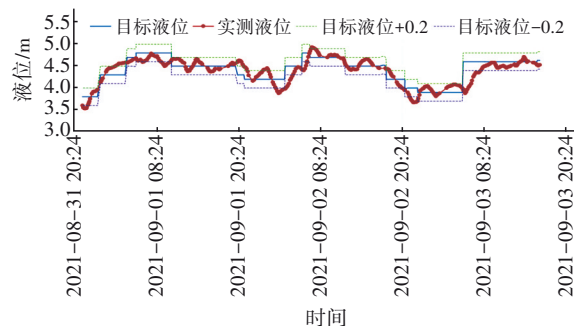


图4 目标液位和实测液位的变化

Fig.4 Change of target level and measured level

图4证明该阶段水平衡系统模型预测水库液位与实测值基本吻合,平均误差<1%。利用水平衡系统模型计算结果,实现了水厂全自动安全、高效运行,确保水库液位在目标液位范围内。自水量模型上线运行至今,调度指令准确执行率达到95%以上。

2.2.2 运行能耗下降

自水量模型上线运行以来,该水厂在生产水量增加8.66%的基础上,出厂水环节中配水单位电耗与同期相比平均下降5.8%(见图5)。

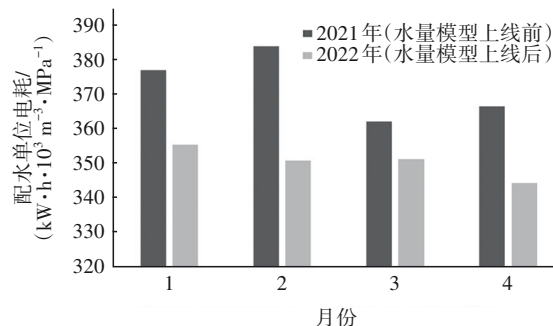


图5 配水单位电耗变化

Fig.5 Variation of unit power consumption in water distribution

在水量模型作用下,一方面,得益于更合理的

进水量调节,使得沉淀池启停次数减少,沉淀池运行更加稳定,混凝沉淀效果更佳,药剂投加量平均减少了2.6%;另一方面,厂内各生产线的水量分配更均衡,砂滤池运行负荷更为均衡,砂滤池平均反冲洗周期延长了10%。这些数据说明水量模型的建立有效提升了水厂运维管理效率,充分体现出数学模型在水厂生产、管理质量提升中的重要作用。

2.2.3 水量调度敏捷

以“收到增加10 kPa调度压力指令”为例,传统方式自收到指令起,经人工回复指令、人工经验判断、手动操作调节等一系列操作后,出厂水压力达到目标值的时间为12 min。当水量模型上线后,模型能够自动接收和自动回复调度指令,迅速计算配水方案,调节出水,出厂水压力增加10 kPa仅需2 min,压力指令调节敏捷性大幅提升。在生产线水量调节方面,水库液位是重要关注对象,以“水库液位增加0.5 m”为例,传统水厂水量调节需要耗时5 min,而水量模型依靠快速计算方案、自动下发指令至PLC系统,可使耗时降至1.5 min。

3 结论与展望

应用实践表明,通过机理模型、数理模型以及数字孪生与仿真平台的综合运用,以机器自主学习、不断迭代择优后可以实现对水厂取水量调整、沉淀池调节、清水库液位控制、供水泵房水泵启停和压力精细化微调的全自动智能模式,不断提升水厂工艺的优化运行水平和设备的全流程控制,实现水量的供需平衡及各生产线制水的均衡,保障城市供水安全、提高自来水生产效率,降低生产成本。在实际应用中也发现,由于不同季节、时段的生产特点导致模型的参数输入边界条件需要进一步优化,水量模型的应用同时要兼顾全过程水质的影响因素、设备设施的检修维保模式下的调度策略调整等问题,可以通过知识图谱、模型联动、MES系统控制等技术不断完善和优化。

参考文献:

[1] 崔昱,邹琳,张明,等. 水厂二泵房能效监控平台在优

化供水调度中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(12): 162-169.

CUI Yu, ZOU Lin, ZHANG Ming, *et al.* Application of energy efficiency monitoring platform of secondary water pumping station in optimization of water supply distribution control [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(12): 162-169 (in Chinese).

[2] 孙凝,赵顺萍,解鹏,等. 智慧水厂管理平台的研究与实践[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 151-155.

SUN Ning, ZHAO Shunping, XIE Peng, *et al.* Research and practice of smart water plant management platform [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 151-155 (in Chinese).

[3] 李亚东,张小强,胡田力,等. 基于全流程工艺的智慧水厂设计与实践[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(9): 83-88.

LI Yadong, ZHANG Xiaoqiang, HU Tianli, *et al.* Design and practice of intelligent water plant based on the whole water treatment process [J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(9): 83-88 (in Chinese).

[4] 何芳,陈锦辉,王国强. 供水二级泵组节能改造方案研究与应用[J]. 给水排水, 2010, 36(9): 100-102.

HE Fang, CHEN Jinhui, WANG Guoqiang. Research and application of energy-saving transformation method of water supply secondary pump set [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(9): 100-102 (in Chinese).

[5] 刘保超. 连云港某水厂二泵房效率分析研究[J]. 供水技术, 2020, 14(4): 14-17.

LIU Baochao. Efficiency analysis of the second pump station of a waterworks in Lianyungang [J]. Water Technology, 2020, 14(4): 14-17 (in Chinese).

作者简介:李柱(1980-),男,江苏徐州人,硕士,高级工程师、中级经济师、国家注册安全工程师,主要研究方向为水厂运行管理和数字化转型。

E-mail:lizhu992@126.com

收稿日期:2022-11-08

修回日期:2022-12-14

(编辑:衣春敏)