张朝, 刘海星, 张蕊, 等. 基于时变控制水位的供水管网优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 937-945, 958. ZHANG C, LIU H X, ZHANG R, et al. Optimal operation of urban water distribution systems using time-variable trigger levels[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 937-945, 958. (in Chinese)

基于时变控制水位的供水管网优化调度

张朝,刘海星,张蕊,周惠成

(大连理工大学建设工程学院,大连116024)

摘要:城市供水管网运行的优化调度对于实现系统节能降耗至关重要。针对传统方法寻优效果差、实用性不高的问题,引入基于水塔时变控制水位的调度规则,在含多水塔的供水管网内探究最经济的多泵站联合调度机制。选用分时水泵状态、固定水塔水位和时变水塔水位为决策变量,分别构建电费最低且水压冗余度最低的多目标优化调度模型,采用第二代非支配排序遗传算法求解。结果表明:基于时变控制水位的调度规则更具经济效益,至少节约 4.93% 的成本;与分时调度计划相比,优化求解更高效,在非固定时段内实现运行状态的灵活切换;相较于固定控制水位,采取更低的控制水位下界,能有效降低高峰电价时段的水塔蓄存量。

关键词:供水管网;时变控制水位;节能降耗;水塔;优化调度

中图分类号: TV143 文献标志码: A DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0093

作为国家水网工程配置精准化的重要环节,供 水管网系统保障着城市日常运行的各行业用水安 全^[1]。在从远端水源取水开始到输配水至各用户的 过程中,加压提水可有效保证用户在水量、水压、水 质方面的服务要求^[2]。随着城市化进程加快,系统 输送水量增加,由加压提水引起的高电耗问题逐渐 凸显。据统计,泵站电耗费用占供水系统总运行成 本的40%~70%^[3]。如何通过科学合理的调控方案降 低加压提水的电耗费用是运维管理人员长期关注 的难点问题。

针对前述问题,学者^[4-6]提出了诸多以节能降耗 为最优化方向的供水管网调度研究,即在满足安全 供水要求的前提下,以最优化模型技术,寻求最经 济的调度运行方案,其中以泵站为调度对象的研究 占据多数。依据优化变量设置情况,这些研究通常 分为两类优化模型研究。结合水泵分时计划调度 模式,第一类优化模型选取逐时段水泵运行状态为 变量,以1h为固定调度时间步长,默认水泵控制状 态切换与系统小时需水量变化同步^[7]。该建模思路 直观简明,在已有的研究进展中获得了广泛关注, 但仍存在研究不足。一方面,待优化变量数与水泵 台数呈正比,求解难度增高,最终解易陷入局部最 优^[8]。另一方面,水泵分时计划调度模式未能考虑 水泵下游运行工况的实时反馈,缺乏灵活调节能力, 导致其最优调度效益被限制^[9]。

出于对系统总体运行工况的实时考量,第二类 优化模型的建模思路通常结合基于控制点关键工 况的水泵调度模式,选取控制点关键工况为水泵状 态切换的触发条件。由于水塔作为管网水压的"指 示器",其运行水位可直观反映系统总体运行工况, 故在已有的研究进展中第二类优化模型以研究基 于水塔控制水位的水泵最优调度规则为主^[10]。该规 则可简化表示为:当水塔运行水位高于或低于某一 控制水位时, 触发切换到对应的水泵运行状态[11]。 故相较于水泵分时计划调度的优化模型,此类模型 有效降低了优化变量维度,更利于模型快速求解与 推广。依据调度周期内水塔控制水位是否存在变 化,该模型变量可分为基于水塔固定控制水位的调 度规则^[12]和基于水塔时变控制水位的调度规则^[13]。 相较于固定控制水位,时变控制水位可在不同时段 内灵活切换水泵运行状态,避免了节点水压冗余情 形,已被相关学者[14-18] 验证具备更佳的节能降耗效益。

收稿日期:2024-02-21 修回日期:2024-08-22 网络出版时间:2024-09-05 网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240905.0912.002 基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208105);国家自然科学基金项目(52122901;52079016) 作者简介:张朝(1992—),男,河北保定人,博士研究生,主要从事供水管网优化研究。E-mail: dlxqzc@163.com 通信作者:刘海星(1984—),男,黑龙江安达人,教授,博士,主要从事城市智慧水务研究。E-mail: hliu@dlut.edu.cn 然而上述研究案例验证仅局限于含单一水塔的 系统,在含多泵站、多水塔的供水管网系统鲜少开 展。在多泵站上下游连接的系统内,泵站间水力联 系密切,探索不同调度方式对于多泵站联合调度的 降耗研究具有重要意义。本研究提出在含多泵站、 多水塔的叠压供水管网系统内,依据3种调度方式, 即水泵分时计划调度模式、基于水塔固定控制水位 的调度规则、基于水塔时变控制水位的调度规则, 分别构建多目标泵站优化调度模型,寻求最经济且 水压冗余度最小的调度方案,对比探究多泵站联合 调控的节能降耗机制。

1 基于水塔控制水位的水泵调度规则

随着数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)技术手段的发展普及, 基于水塔控制水位的水泵调度规则得到了逐步应 用。具体而言,当水塔水位高于控制水位上界时, 触发水泵切换到降低输出扬程的运行状态,促使用 户端水压降低,进而减少向水塔蓄水量,避免水塔 溢流的情况出现;当水塔水位低于控制水位下界时, 触发水泵切换到增加输出扬程的运行状态,促使用 户端水压升高,进而减少水塔的向外补水量,避免 水塔腾空的情况出现。当前在全调度周期内仅设 置一对水塔控制水位上下界,是最为常见的调度规 则,即基于水塔固定控制水位的调度规则,其固定 不变的设定具备操作简便、易推广等优点。

以基于水塔控制水位启停水泵的管网系统为例, 考虑 2 个分时电价时段,图 1(a) 展示的是基于固定 控制水位的调度规则的水塔运行水位轨迹(黑线)和 固定控制水位上下界(红线)。由水塔水位轨迹与控 制水位上下界的大小关系,可推断触发水泵启停的 时间点,即在时刻点 a₂、a₃、a₄水泵开启;在时刻点 b₁、b₂、b₄水泵关闭。理想情况下,在低谷电价时段 结束时,水塔水位应达到高点,*L*(b₃)明显低于控制 水位上界 *L*_{off},在高峰电价时段水塔出现任何高于 *L*(b₃)的运行水位表明水泵未充分利用单位低价蓄 存更多的水量以满足用户需求;在高峰电价时段结 束时(时间点 a₁),水塔水位应达到低点,*L*(a₁)明显 高于控制水位下界 *L*_{on},超过控制水位下界的蓄存水 量,表明泵站在高峰电价时段抽取水量偏多。上述 2 种情形都可能导致泵站提水经济成本增高。

基于水塔时变控制水位的调度规则允许不同电价时段内设置不同控制水位上下界,即 Loff、Lon 不为

•938 • 水文水资源

固定值,因此水泵运行状态的切换条件具备时变性, 这为在不同电价时段内灵活调控水塔调蓄水量提 供支持。图 1(b)展示了基于时变控制水位的调度 规则的水塔水位轨迹。与图 1(a)相比,低谷电价时 段 *T*,内控制水位下界 *L*_{on}(*T*_v)高于图 1(a)内 *L*_{on},促 使在低谷电价时段结束时水塔水位相对较高,表明 该调度工况更有效地利用了低单位电价的蓄存水 量;高峰电价时段 *T*_p内控制水位上界 *L*_{off}(*T*_p)高于 图 1(a)内 *L*_{off},促使在高峰电价时段结束时水塔水位 相对偏低,表明该调度工况可有效减少高单位电价 的加压水量。



图 1 基于水塔控制水位的调度规则的水塔水位轨迹 Fig. 1 Water level trajectory in tank by two regulation rules with different kinds of control levels

2 优化调度数学模型

结合 3 种调度方式,即水泵分时调度计划、基 于水塔固定控制水位的调度规则、基于水塔时变控 制水位的调度规则,分别构建双目标优化模型,由 模型 A、B、C 简化区分。为确保模型对比有效性, 除在决策变量和约束条件方面存在差异外,其他组 成部分基本保持一致。

2.1 决策变量

模型 A 的决策变量为调度周期内时刻*i*水泵 *p* 的运行状态*X_{i,p}*,简化考虑启停状态,其取值仅为 0 和 1,故各水泵对应的变量数为调度周期时段数。 模型 B 的决策变量为用于控制水泵启停的水塔*t*控 制水位上下界,其在调度周期内固定不变,故各水 泵对应的变量数仅为 2。该调度规则见公式(1),基 于时刻*i*水塔*t*水位*L_{i,t}*(m)与其控制水位上界*L_{i,t,off}*(m) 和下界*L_{i,t,of}*(m)的大小关系,确定各对应水泵的启 停状态。

$$X_{i,p} = \begin{cases} 0 & L_{i,t} \ge L_{i,t,off} \\ 1 & L_{i,t} \le L_{i,t,on} \end{cases}$$
(1)

模型 C 的决策变量同样为水塔控制水位上下 界, 与模型 B 区别在于控制水位可随时刻*i*设置不同, 采用*L_{i,t,on}*(m)和*L_{i,t,of}*(m)表示。同一分时电价时段 内保持控制水位上下界不变, 故各水泵对应的变量 数为分时电价数的 2 倍。

2.2 目标函数

2.2.1 电费最小化

将供水管网运行成本简化为泵站电耗费用,本 模型视电费最小化为优化目标之一。调度周期内 泵站加压提水总电费为各时段各水泵总功率与分 时电价的乘积和,表达式为

$$\min C_{e} = \sum_{i=1}^{n_{e}} \sum_{p=1}^{n_{p}} X_{i,p} C_{i}(\gamma Q_{i,p} H_{i,p} \Delta t_{i} / \eta_{i,p})$$
(2)

式中: C_e 为总费用,元; C_i 为时段 i的分时电价, 元/(kW•h); γ 为水的比重系数; $Q_{i,p}$ 为时段i水泵p的 提水量, m³/h; $H_{i,p}$ 为时段i水泵p的扬程, m; $\eta_{i,p}$ 为时 段i水泵p的水泵效率, %; Δt_i 为时段i时间长度, h; n_t 为调度时段数; n_p 为水泵台数。

2.2.2 水压冗余度最小化

节点压力过高会增加管线漏损风险。减小节点 冗余水压同样是管网调度需考量的重要因素。本 模型选用水压冗余度指标^[19]最小化为优化目标值, 见公式(3)。该指标指的是各调度时段各用户节点 水压超出最低服务水压要求的冗余量占最低服务 水压要求的比例之和,无量纲,数值越小,水压冗余 情况越符合调度预期。

$$\min H_{\rm r} = \sum_{i=1}^{n_{\rm t}} \sum_{j=1}^{n_{\rm n}} \frac{\left| H_{i,j} - H_{i,j,\min} \right|}{H_{i,j,\min}}$$
(3)

式中: *H*_r为水压冗余度; *H*_{i,j}为时段*i*用户节点*j*的自由水压, kPa; *H*_{i,j,min}为时段*i*用户节点*j*的最低服务水压要求, kPa; *n*_n为用水节点数。

2.3 约束条件

2.3.1 节点水压要求

调度周期内各时刻各节点水压满足最低服务水 压要求,见公式(4)。同时水塔水位不宜低于水塔腾 空限制水位。

$$H_{i,j} - H_{i,j\min} \ge 0 \tag{4}$$

$$L_{i,t} - L_{t,\min} \ge 0 \tag{5}$$

式中:L_{t,min}为水塔t最低水位限制,m。

2.3.2 水泵启停切换次数限制

水泵状态切换频繁易导致水泵磨损。故在模型 内对全调度周期内各水泵*p*状态切换总次数进行限 定^[20],其不超过最大启停切换次数*N_{p,max}*,表达 式为

$$N_{p,\max} - \sum_{i=1}^{n_{\rm t}} \max(0, X_{i,p} - X_{i-1,p}) \ge 0 \tag{6}$$

2.3.3 调度周期末水塔水位

在调度周期末水位与开始时各水塔水位接近, 可确保进入下一调度周期后,在相同的方案下,系 统运行工况与最优工况接近。由于水压冗余度最 小化的优化目标设置,本模型只简化要求在调度周 期结束时水塔水位*L*_{n,t}(m)高于开始时水位*L*_{0,t}(m), 表达式为

$$L_{n,t} - L_{0,t} \ge 0 \tag{7}$$

2.3.4 调度周期末水泵状态

保持调度周期结束时水泵状态与开始时状态相同,在进入下一调度周期后,可确保系统运行工况接近于最优工况,故强制要求在调度周期结束时刻各水泵的运行状态*X_{n,p}*与开始时刻*X_{0,p}*保持一致,表达式为

$$X_{n,p} - X_{0,p} = 0 \tag{8}$$

2.3.5 控制水位上下界的边界约束

为避免水塔控制水位的控制范围过窄导致水泵 切换状态频繁,故模型 B 和模型 C 设置控制水位上 下界的差值不低于水塔t最小值*R*_{t,min}(m),表达式为

$$L_{i,t,\text{off}} - L_{i,t,\text{on}} - R_{t,\min} \ge 0 \tag{9}$$

2.3.6 管网水力学方程组

已知管网各组件属性、需水量、水塔初始水位 等基础管网信息和调度方案,获取节点水压、水塔 水位和水泵工况点等运行信息,需进行管网水力平 差计算^[21]。选用 EPANET 2.2^[22]水力计算引擎执行 管网平差计算。该工具免费开源,计算快速精确, 提供稳定便捷的函数接口。当水力平差结果不收 敛, EPANET 会返回非 0 的模拟报错代码,优化模型 视其为不可行管网工况,故限定模拟报错代码为 0。 2.4 模型 求解

本模型调用 EPANET 封装函数接口, 隐藏水力 学方程组的显式求解。此模型特点适于采用启发 式算法进行求解^[5], 不适于内嵌水力学方程组的非 线性规划等精确算法。同时, 为满足多目标帕累托 解集的寻优需求,多目标优化的启发式算法采用非 支配排序,避免对各目标权重的选取,可寻求分布 范围更广的解集。第二代非支配排序遗传算法 (nondominated sorting genetic algorithm II,NSGA-II)^[23] 是当前最常用的多目标启发式算法之一,且在供水 管网优化问题求解中应用成熟稳定^[24],故选用该方 法作为模型求解算法。尽管 NSGA-II 存在求解低 效难题,默认不考虑算力限制,设置多次随机求解, 以确保最优帕累托解集可靠。 综上,模型求解流程绘制见图 2。总体上,每一 步迭代,NSGA-II 求解框架产生新的方案集,输入 到 EPANET 模型中;经方案评估后,将目标函数值 和约束违反程度值返回到 NSGA-II 求解框架内,然 后进入下一步迭代,以此类推,直到迭代循环进程 结束,输出最优帕累托解集。在方案评估环节中, 各模型的决策变量,需经 EPANET 中不同的函数接 口配置到管网模型中。



图 2 供水管网优化调度模型求解流程

Fig. 2 Flowchart of solution of optimal operation model in WDS

3 应用案例

D 城区供水管网是一个典型的多泵站、多水塔 联合供水系统^[25],见图 3。依据泵站、水塔和阀门布 局,系统划分为 5 个独立计量分区(district meter area, DMA),信息汇总见表 1。水厂泵站 S1 从总水 源提水到下游,中途经各叠压泵站 S2~85 加压,向 所在 DMA 内用户供水。由图 4 可知,各需水点高 峰用水时段集中在 17:00—21:00,高峰电价时段为 10:00—17:00。



Fig. 3 Layout of D-Town WDS

表 1 各 DMA 信息 Tab. 1 Information of each DMA

项目	DMA-1	DMA-2	DMA-3	DMA-4	DMA-5
DMA入口节点	—	J9300	J9289	J9301	J9307
需水节点数	131	42	83	43	49
日需水总量/m ³	8 766.14	2 536.25	5 500.45	2735.67	3 263.87
泵站	S 1	S2	S3	S4	S5
水泵	PU1 PU12	PU4 PU5	PU6	PU8 PU9	PU10
初始状态	开启 开启	开启 关闭	开启	关闭 开启	开启
水塔	T1	Т3	T4	Т5	T7
初始水位/m	3.250	3.375	2.350	2.250	2.500





目前该系统内现行调度方案为方案 d, 是一种 基于水塔固定控制水位的调度规则,其运行电费为 6730.43元, 管网水压冗余度为 1.871 2。针对当前 运行工况耗电多、节点水压冗余的问题,结合本研 究优化调度模型,寻求在24h调度周期内8台水泵 联合调度的最优方案(其余4台水泵默认处于全部 开启状态)。由于各泵站均为定速泵并联供水,即 水泵运行状态仅为开闭2种状态,故本研究仅考虑 水泵分时启停计划和基于水塔控制水位的调度规 则的优化求解。其他参数设置如下: Hi imin均为 400 kPa; L_{i,t,min}均为 0.5 m; N_{p,max}均为 4; R_{t,min}均为 1 m。 模型 A 决策变量数为 192, 模型 B 决策变量数为 16, 模型 C 决策变量数为 48。由此,在 NSGA-II 算法种 群大小方面,模型A设置为400,而模型B、C设置 为100。经基础性分析和多次调参测试, NSGA-II 算法中遗传算子参数对最终寻优结果影响不显著, 其他参数均设置相同。具体如下:最大迭代数为 1000, 锦标赛选择算子个体数为4, 模拟二进制交叉 算子交叉概率为 0.95, 分布指数为 20; 多项式变异 算子变异概率为 0.05, 分布指数为 15。以单次优化 求解执行的最大水力模拟次数(NFE)为计,模型 A 求解所需 NFE 为 40 万次, 为模型 B 和 C 的 4 倍, 求解效率低下。

4 结果分析

为降低各模型求解的随机性,采用 30 次随机种 群初始化,获得 30 个近似帕累托解集。随后,对这 些解集进行非支配排序,得到最优帕累托前沿解集, 见图 5。由两优化目标取值可知,解集 C 内全部解 可严格支配其他解集,即基于时变控制水位的调度 规则的优化模型可寻求目标值更优的解。在同等 管网水压冗余度水平下,解集 C 电费成本低于其他 解集,以最低费用 5 289.27 元为计,至少节省 4.93% 的电费成本。与 d 相比,各优化模型帕累托解集内 方案在两目标上都取得更优值,说明通过优化模型 手段可有效改善现行工况。以解集 C 内最低电费 5 289.27 元为计,最多可节省 21.41%;在水压冗余度 方面,解集 C 最多可降低 3.61%。

从各解集内选取管网水压冗余度数值接近的最 优解,重点分析其在降耗方面的差异,最终选取管 网水压冗余度为1.817 附近的方案 a、b、c 为分析方 案(图 5)。在各分析方案的调度下,各水泵在全调 度周期内总启停次数均小于 4 次,表明水泵调度安 全;调度周期末各水塔水位高于调度周期初,且水 塔未出现溢流和亏空的情形,表明水塔运行安全, 故选取各分析方案合理。如图 6 所示,相较于其他 方案,方案 d 在高峰电价时段电费明显较高,尽管方 案 a 在 S5 的电费高于 d(由于方案 a 在电价高峰期 内 PU10 处于开启状态,而方案 d 处于关闭状态,见 图 7),但总体电费仍低于 d,表明各优化模型可结合 分时电价寻求更具经济性的调度方案。相较于 a 和 b,方案 c 各泵站费用成本都较低,在 S4 节省电 费最为明显。



Fig. 6 Comparison between electricity cost from three periods under four selective solutions

方案 a 分时水泵启停计划及方案 b、c、d 的各 泵站运行状态见图 7。方案 b、c、d 的水塔控制水 位及在各方案调度下各水塔运行水位见图 8。图 7 水泵开启时间在电价高峰时段占比越少,水塔错峰 蓄水的节能效果越明显,电费成本越低。方案 c 占 比最少,方案 d 则最多。同时方案 a 以 1 h 为切换 水泵状态的时间步长,易造成水塔顶托效应。以 S5 为例,在电价高峰期,相较于方案 c,方案 a 同时 启用 2 台水泵进行提水,导致在用水高峰期水塔 T7 水位明显偏高(图 8),相应的电费成本随之升高。

图 8 中方案 c 在电价高峰时段内控制水位下界 最低, 蓄存到水塔内水量最少; 同时在全调度周期 内上下界控制范围最小, 有效减少水泵状态切换时 间, 最大程度上发挥水塔调蓄作用。对于被触发的 控制水位上下界,相较于固定控制水位调控,时变 控制水位调控更为灵活。以 S4 为例,方案 c 在平时 电价时段 PU9 控制水位下界偏高,触发水泵切换到 开启状态,同时在高峰电价时段 PU9 控制水位下界 偏低,促使 S4 泵站在高峰电价时段内多时处于关闭状态,DMA-4 全区用户可由水塔 T5 进行供水。 而方案 b 控制水位下界在全周期固定不变且偏高, 致使 PU9 在高峰电价时段处于开启状态。











Fig. 8 Comparison between operating tank levels under four selective solutions

为探究各下游泵站与上游泵站 S1 间水力联系, 图 9 绘制各 DMA 人口节点逐时段水压(即各泵站 上游余压)。在近端泵站 S2 和 S3 人口,各方案水 压在电价高峰时段较为接近,最大差值不超过 20 kPa, 表明不同方案下 S1 工况点接近,其电费成本相近。 在远端泵站 S4 和 S5 人口,方案 c 在电价高峰时段 内水压远高于方案 a 和 b,最高差值可达 100 kPa,同时水泵 PU8~10 大部分时间处于关闭状态,表明方案 c 中水塔 T1 补充用户供水量明显少于后者,验证了水塔 T1 内水位呈现下降较缓趋势,为多泵站系统以较低电费成本提供安全供水支持。



图 9 各调度方案下各下游 DMA 入口节点水压对比

Fig. 9 Comparison between nodal pressure at the inlet of each downstream DMA under four selective solutions

5 结论

引入基于水塔时变控制水位的调度规则,构建 电耗费用最小、管网水压冗余度最低的双目标管网 优化调度模型。在多泵站、多水塔联合供水的案例 应用中,与分时调度计划和基于水塔固定控制水位 规则等2种方式进行对比探讨,挖掘其优化节能降 耗机制。结果表明,在同等管网水压冗余度水平下, 时变控制水位的调度规则可寻求更优的帕累托方 案,至少节约4.93%的电耗费用。相较于固定调度 步长的分时计划,时变控制水位的调度优化求解高 效,直观考虑水塔顶托作用,可避免高峰电价时段 内过量蓄水;相较于固定控制水位的调度,时变控 制水位的调度以灵活控制水位下界,有效降低高峰 电价时段内的蓄水量。在多泵站上下游联合供水 中,时变控制水位的调度可实现更大幅度的经济 增益。

参考文献:

- [1] 赵勇,何凡,何国华,等.国家水网基础认知与建构准则[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21
 (6):1049-1054. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0101.
- [2] 高泽晨. 基于水力模型的城市供水主干管网联通工程研究 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 35-41.
 DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.006.
- [3] 谢红. 城乡一体化供水增压泵站优化运行策略研 究 [D]. 上海: 同济大学, 2020.
- [4] MALA-JETMAROVA H, SULTANOVA N, SAVIC
 D. Lost in optimisation of water distribution systems?
 a literature review of system operation[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 93: 209-254.
 DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.02.009.
- [5] BRENTAN B, MEIRELLES G, LUVIZOTTO JR E, et al. Joint operation of pressure-reducing valves and pumps for improving the efficiency of water distribution systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(9): 4018055. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000974.
- [6] PERELMAN G, OSTFELD A. Adjustable robust optimization for water distribution system operation under uncertainty [J]. Water Resources Research, 2023, 59(12); e2023WR035508. DOI: 10.1029/2023WR035508.
- [7] 马晴晴, 吴珊, 王昊, 等. 雨水管网健康度评价与应用[J]. 水利水电技术 (中英文), 2022, 53(3): 195-204. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.03.019.
- [8] HU S, GAO J, ZHONG D. Multi-agent reinforcement

learning framework for real-time scheduling of pump and valve in water distribution networks[J]. Water Supply, 2023, 23(7): 2833-2846. DOI: 10.2166/ws. 2023.163.

- [9] GUO Y, WANG S, TAHA A F, et al. Optimal pump control for water distribution networks via data-based distributional robustness[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31(1): 114-129. DOI: 10.1109/TCST.2022.3167844.
- BIN MAHMOUD A A, MOMENI A, PIRATLA K
 R. Optimal near real-time control of water distribution system operations [J]. Water, 2023, 15(7): 1280.
 DOI: 10.3390/w15071280.
- [11] CREACO E, CAMPISANO A, FONTANA N, et al. Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review[J]. Water Research, 2019, 161: 517-530. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.025.
- [12] 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. DOI: 10.1016/j. jclepro.2018.12.190.
- HOUSH M, SALOMONS E. Optimal dynamic pump triggers for cost saving and robust water distribution system operations[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2019, 145(2): 4018095. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001028.
- [14] WANG Y, TOO Y K, WU W, et al. Minimizing pumping energy cost in real-time operations of water distribution systems using economic model predictive control[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(7): 4021042. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001399.
- [15] ALVISI S, FRANCHINI M. A methodology for pumping control based on time variable trigger levels[J]. Procedia Engineering, 2016, 162: 365-372. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.076.
- [16] WU D, NGUYEN V H, MINOUX M, et al. An integer programming model for minimizing energy cost in water distribution system using trigger levels with additional time slots[A]. 2021 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF)[C]. Hanoi, Vietnam, 2021.
- [17] CHEN W, TAO T, ZHOU A, et al. Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123573. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020. 123573.
- [18] QUINTILIANI C, CREACO E. Using additional time slots for improving pump control optimization

based on trigger levels [J]. Water Resources Management, 2019, 33(9): 3175-3186. DOI: 10.1007/s11269-019-02297-6.

- [19] DINI M, HEMMATI M, HASHEMI S. Optimal operational scheduling of pumps to improve the performance of water distribution networks[J]. Water Resources Management, 2022, 36(1):417-432. DOI: 10. 1007/s11269-021-03034-8.
- [20] 张朝, 刘海星, 顾建强, 等. 基于需水不确定性的供水管网优化运行研究 [J]. 给水排水, 2019, 55(11):124-130. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2019.11.027.
- [21] 张红梅,刘成荣,吴鑫森. 基于 HPSO 的供水管网摩 阻因数反演 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(3): 619-624. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk. 2022.0063.
- [22] ROSSMAN L A, WOO H, TRYBY M, et al. EPANET2.2 users manual, EPA/600/R-20/133[R].
 Washington: United States Environmental Protection

Agency, 2020.

- [23] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J].
 IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017.
- [24] SITZENFREI R, WANG Q, KAPELAN Z, et al. Using complex network analysis for optimization of water distribution networks[J]. Water Resources Research, 2020, 56(8): e2020WR027929. DOI: 10.1029/ 2020WR027929.
- [25] STOKES C S, MAIER H R, SIMPSON A R. Water distribution system pumping operational greenhouse gas emissions minimization by considering time-dependent emissions factors[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2015, 141(7): 4014088. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452. 0000484.

Optimal operation of urban water distribution systems using time-variable trigger levels

ZHANG Chao, LIU Haixing, ZHANG Rui, ZHOU Huicheng (School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning 116024, China)

Abstract: As integral components of China's national water network project, water distribution systems play a pivotal role in ensuring the safe utilization of water across various urban industries. However, the substantial energy consumption associated with operating these systems poses a significant challenge, hindering both the efficient utilization of water resources and the implementation of carbon reduction policies Consequently, there is an urgent need to address this issue and pursue avenues for improvement. Optimal operation research has been identified as a key strategy for promoting energy conservation in water distribution systems. Traditional strategies on optimal operation in water distribution systems typically adopted time-table schedules by the fixed time step as explicit decision-making for pumps. This strategy is easy-to-use, but it lacks of flexibility for pump switch when there are storage infrastructures in water distribution systems. Another issue is that the fixed time step constrains the attainment of maximal economic benefits through pump scheduling.

This paper introduced a novel strategy that integrates time-variable trigger levels in storage tanks as an implicit decision-making rule for pump operation, with the aim of investigating potential energy-saving opportunities. More specifically, distinct pairs of trigger levels in tanks were assigned to regulate corresponding pumps during different electricity tariff periods. A multi-objective operational optimization model for water distribution systems was established to minimize electricity costs while minimizing the redundancy level of water pressure. This model was compared with two traditional strategies: time-table schedule and operation rules based on fixed trigger levels in tanks. These three models were then evaluated in a network case involving multiple pumps and tanks, with the objective of exploring the operational characteristics of joint pump and tank operations in water distribution systems.

Results demonstrated that the strategy using time-variable trigger levels was capable of yielding superior Paretooptimal solutions across both objectives compared with the two other strategies. Maintaining equal redundancy level of hydraulic pressure, this strategy facilitated the identification of greater economic benefits, resulting in a minimum

(下转第958页)