

基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度

信昆仑, 瞿玲芳, 陶涛, 颜合想

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 研究了通过计算节点平均水龄分析该地区供水管网的水质状况的方法,在此基础上,提出供水管网综合水龄指数评价指标,并基于该指数构建管网水力优化调度模型,采用遗传算法实现优化问题的求解,并以江苏某镇城乡统筹供水管网为实例进行了应用.结果表明,水力优化调度能够改善管网的综合水龄情况,尤其是对于流量较大的节点有明显的效果,但是对于管网末端水量相对较小节点,则需要结合水力调度以及管段冲洗等方式来改善管网水龄情况.

关键词: 供水管网; 节点水龄; 优化调度; 遗传算法

中图分类号: TU991

文献标志码: A

Optimal Scheduling of Water Supply Network Based on Node Water Age

XIN Kunlun, QU Lingfang, TAO tao, YAN Hexiang

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A water quality model for the water distribution network of a town MD was established with EPANET2. Water ages of the nodes were analyzed to evaluate the water quality condition of the water supply network through the simulation. Then an optimal scheduling model based on the comprehensive node water age index was proposed and solved with genetic algorithm method. The results of application the optimal model to a county water distribution network indicate that the hydraulic optimal scheduling is able to improve the comprehensive water node age, especially for the nodes with big water demand. While for nodes with relatively small flow located at the ends of water supply network, water distribution system flushing is still necessary to ensure the tap water quality at the end of the network.

Key words: water supply network; water age; optimal scheduling; genetic algorithm

近年来,我国许多大中型城市的供水管网,日益形成以水厂为主体供水水源的多水源供水系统,在这种供水模式下,供水管网的服务范围空前扩大,管网中水质分布不均匀,尤其是供水管网末端,水在管道中停留的时间较长,水质得不到有效保障^[1].水在管网中的停留时间是指水从水源节点至各节点的流经时间,也被称为节点“水龄”^[2].大量检测结果表明,随着节点水龄的增大,管网中余氯浓度随之衰减^[3],节点水龄过长,管网中水质无法得到保障;相反,节点水龄过短,水中余氯浓度过高,异味过重,不宜饮用.因此,水龄可以作为评价管网水质的重要指标,分析节点水龄对改善供水管网水质具有重要意义.

城市供水管网的运行需要合理的调度,使管网在满足供水要求的前提下,让管网的压力更合理、水质更优良.如何通过优化调度,控制城市供水管网的水压和水质成为了国内外供水行业研究的重要课题.目前,国内外学者所提出的优化调度模型主要是以运行费用为目标函数,以满足管网的水力特性方程以及其他技术性条件为约束,进行系统的整体优化.国外,Savic^[4],Lopez-Ibanez^[5]和Baran^[6]等人分别提出以运行维护和能量费用为目标,进行优化求解,得到较优的优化方案.国内学者从上世纪七十年代开始将计算机技术应用于城市供水管网系统的优化调度,取得了不少成果.杨芳^[7]等人考虑将水资源费、运行电费、制水成本作为经济运行指标,建立了节水状态下城市供水管网优化调度模型.郑飞飞^[8]等人建立了一种多水源管网的耦合优化调度模型,添加了节点水龄约束,通过对最不利节点的水龄控制,考虑了调度方案的水质安全性.此外,也有部分学者直接以水质为优化目标,对供水管网中水厂的供水量、泵站的运行情况优化调度,湖南大学的胡益^[9]建立了基于水压和水质的管网优化调度模型并且采用遗传算法实现了管网的优化调度.这些研

收稿日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51378374)

第一作者: 信昆仑(1977—),男,教授,博士生导师,工学博士,研究方向为水资源与给水排水系统设计与运行最优化.

E-mail: xkl@tongji.edu.cn.

究成果在实际管网中都有较好的应用.但是,目前所研究的优化调度大多只针对经济因素,对水质的要求,主要将其作为约束条件考虑,随着社会的发展进步,人们对给水水质的要求不断提高,水质应直接作为优化调度的目标,供水系统运行应进行更科学合理的优化调度.

本文主要以某镇的供水管网为研究对象,通过计算节点水龄值,以监测节点的综合水龄为优化目标,建立供水管网优化调度模型,利用 Matlab 编写程序,对该管网系统中各水源供水量进行合理的调度分配,研究不同水力工况下各监测节点的水龄状况,为该地区管网水质优化研究提供科学依据.

1 供水管网优化调度模型

在供水管网中,供水工况的不同,会造成用水量在整个供水管网中的分布不同,从而影响管道中节点的水流速度,造成节点水龄的差异.节点水龄是反映管网水质状况的重要指标之一,一般来说,水流流速快,节点水龄小,余氯浓度大,而水流流速慢,节点水龄大,余氯浓度小.相对于余氯等水质指标需要复杂的监测手段且只能反映某些节点的水质状况,管网中所有节点水龄均可通过水力模拟计算得出,可以作为全面反映管网整体水质状况的简便易行的指标.因此,以降低管网整体水龄为目标,通过将水源、水泵与管网有机结合,优化分配各水厂、各泵站的供水量,确定供水系统的最佳运行状态,调整管段的流速和流向,使水在管道中保持一定的流速,从而减少节点水龄,减少余氯的衰减量,可以达到整体改善管网水质的目的.基于上述思路,以管网水质整体优化为目标,建立了给水管网优化调度模型.

1.1 节点水龄的计算

节点是水流汇聚与重新分布的连接点,而节点水龄则是各管径水龄的汇聚与重新分布^[10].国内,最常用的水龄计算方法是赵洪宾^[1]教授提出的节点水龄计算方法,在计算时,设置水源节点处的水龄值为 0,并且考虑到任一节点往往具有一个以上的供水路径,通过不同供水路径进入该节点的流量也各不相同,假设来自不同供水路径的水在各个节点处按权重混合,那么,任一节点的水龄就等于水在该节点不同的水源供水路径所经历的不同时间的加权平均值^[1],其数学表达式为

$$T_i = \frac{\sum_{n=1}^N q_{0i}^{(n)} T_{0i}^{(n)}}{\sum_{n=1}^N q_{0i}^{(n)}}; \quad N \in L^i \quad (1)$$

式中: T_i 为节点 i 的水龄, h ; $T_{0i}^{(n)}$ 为沿节点 i 的第 n 条供水路径,水从水源流到节点 i 所经历的时间, h ; $q_{0i}^{(n)}$ 为来自第 n 条供水路径的供水量, $L \cdot s^{-1}$; L^i 为节点 i 所有上游水源供水路径的集合.

1.2 模型的建立

基于减小管网节点水龄这一目标,对管网进行水力调度优化,得到管网节点水龄最小的工况,即为所需要的水质最佳的工况.目前,大多数学者选择节点水龄绝对值或者节点水龄相对于节点流量的加权平均值作为指标来评价管网中水质状况,但是作为供水管网优化调度的目标函数,这两种方法显然存在不合理之处.供水管网中的末端往往用水量较小,这也是导致节点水龄大的原因之一,若采用权重法计算得到的水龄作为目标函数对管网进行优化,那么,对管网末梢节点流量较小的节点很难起到优化的效果,而这些节点恰好就是水龄较大、水质较差的区域,也是基于供水管网水质改善的优化调度的目标区域.因此,为了更好地用节点水龄评判每个工况下管网的水质情况,提出采用综合水龄指数作为算法的目标函数.将供水管网中的节点按水龄值的大小划分为近水源节点、管网中段节点和管网末梢节点三类,分别考虑每一类监测节点的水龄相对于流量的加权平均值,最后,通过设定合理的权重系数,得到该工况下的综合水龄指数.因此,该优化问题的目标函数为

$$\min \sum_{m=1}^3 \lambda_m \left[\frac{\sum_{i \in S_m} T_i q_i}{\sum_{i \in S_m} q_i} \right] \quad (2)$$

式中: q_i 为监测节点 i 的流量, $L \cdot s^{-1}$; λ_m 为系数, λ_1, λ_2 和 λ_3 分别表示近水源、管网中段和管网末梢的系数; S_m 为属于所在管段区间的监测节点的集合, S_1, S_2 , 和 S_3 分别表示近水源区域、管网中段区域和管网末梢区域.

在每个区域内,用节点流量对于节点水龄的加权平均值反映每个区域内的水龄情况,保证了大流量用户的水质;在不同区域之间,用权重系数加以限制,保证不同区域内,尤其是管网末梢区域的水质,因此,该目标函数能够比较合理地代表整个管网的水质情况.而在整个目标函数中,最主要的是要确定供水区域以及对应的权重系数.供水管网区域的划分,主要通过以下方法实现:利用 EPANET 2 计算工具箱对管网进行水龄模拟,找到该管网水龄最大的节点,并且以该节点的水龄 T_{\max} 为基础对该管网的节点进行分类.

$$\text{节点 } i = \begin{cases} \text{近水源节点} & \frac{T_{\max}}{3} \geq T_i > 0 \\ \text{管网中段节点} & \frac{2T_{\max}}{3} \geq T_i > \frac{T_{\max}}{3} \\ \text{管网末梢节点} & T_{\max} \geq T_i > \frac{2T_{\max}}{3} \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_{\max} 为某工况下,该管网的最大水龄值, h;

权重系数 λ_m 的设置主要是为了提高对管网末梢区域的优化效果,位于管网末梢的节点,用水量一般较小,因此,权重系数 λ_m 的确定就跟每个部分的节点水量有关,每个区域的权重系数取每个区域节点流量和的倒数所占的比例,表达式为

$$\lambda_m = \frac{1 / \sum_{i \in S_m} q_i}{1 / \sum_{i \in S_1} q_i + 1 / \sum_{i \in S_2} q_i + 1 / \sum_{i \in S_3} q_i} \quad m = 1, 2, 3 \quad (4)$$

在建立优化调度模型的同时,还需考虑约束条件,模型必须满足该系统运行所需满足的水压、水量等技术要求,其约束条件如下:

(1) 考虑各水源的日供水能力限制.

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (5)$$

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (6)$$

式中: Q_i 为水源 i 的供水量, $L \cdot s^{-1}$; Q_{\max} 为水源 i 的最大供水量, $L \cdot s^{-1}$; Q_{\min} 为水源 i 的最小供水量, $L \cdot s^{-1}$; H_i 为水源 i 的供水压力, m; H_{\max} 为水源节点 i 的最大供水压力, m. 一般来说,根据目前常用给水管材及管网漏损和爆管的考虑,结合国家规范要求,建议管网节点最大自由水压取 $45 \sim 60 \text{ m}^{[11]}$; H_{\min} 为水源节点 i 的最小供水压力, m. 根据上海城市供水调度管理规定,确保城镇供水压力 0.16 MPa , 管网压力合格率 $97\%^{[12]}$, 因此,参考有关规定,根据各个监测点压力的历史数据,并结合研究实例属于城乡统筹供水乡镇区域的性质,取最小值压力约束为 10 m .

在实际的多水源供水系统中,各水源的供水能力是有限的,因此,如果调度模型中对各水源的供水能力没有约束,就会导致在优化调度决策中得出的运行方案,由于有些水源的供水能力达不到方案要求而无法实施,因此,在建立优化调度模型时要考虑约束条件式(5)~式(6).

(2) 供需水量平衡:即各水源供水量之和等于各节点用水量之和.

$$\sum_{i \in Q_j} Q = \sum_{n=1}^N q_n \quad (7)$$

$$H_{F_j} - H_{T_j} = h_j \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

式中: Q 为所有水源所在的集合; q_n 为节点 n 的用水量, $L \cdot s^{-1}$; N 为节点个数; H_{F_j} 和 H_{T_j} 分别表示管段 j 起点和终点的节点水头, m; h_j 为管段 j 的压降, m; M 为管段数目.

在管网模型中,所有节点都与若干管段相关联,对于管网模型中任意节点 j ,根据质量守恒定律和能量守恒定律,必须满足管网流量连续性约束式(7)和能量平衡性约束式(8).

1.3 模型的求解

针对所建立的优化调度模型,取水源的供水量 Q 作为寻优变量,在每一工况下,利用美国环境保护署开发的 EPANET 2 模拟软件,计算各监测节点的流量和水龄值,代入目标函数式(2),可求得每一工况下的综合水龄指数,再根据综合水龄指数找出最优工况.由模型可知,该模型是一个全局优化的模型,采用遗传算法求解十分方便,而且遗传算法具有较好的全局搜索的功能,在供水管网中的应用比较成熟,所以,对于该模型的求解,将采用遗传算法通过 Matlab 编程实现.

2 算例分析

图 1 为某镇的供水管网,该管网共有 477 个节点,572 根管段,总管段长度 $147\,911.1 \text{ m}$,日供水量约为 $57\,300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,由于该管网是某市城乡统筹管网的乡镇管网部分,通过市区主管网的 4 个供水节点(张思桥、谢村路、金山路、藏书日辉滨桥)供水,在应用本研究提出的优化模型时,将其视为水源节点,并根据接入点的供水能力结合历史供水数据设置接入水量的上下限约束.某镇供水管网设有 12 个水质监测点,具体位置如图 2 所示.

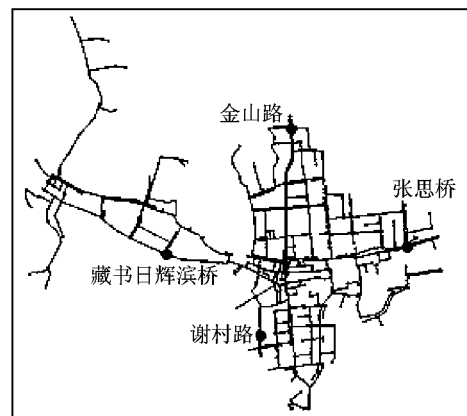


图 1 某镇管网拓扑结构图

Fig.1 Topology structure of networks in a town

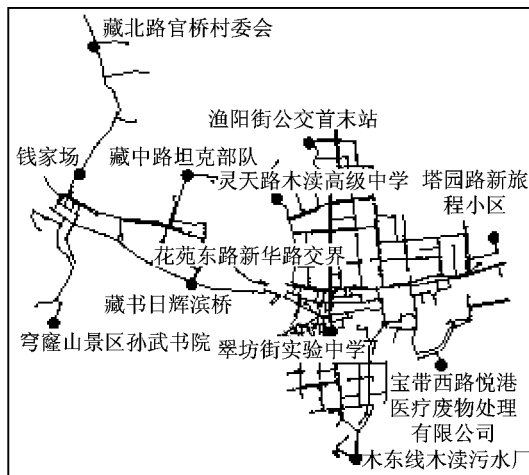


图2 水质监测点具体位置

Fig.2 Location of water quality monitoring spots

管网节点水龄无法直接通过设备监测,因而采用经过校核准确的某镇供水管网水力模型,针对该镇2014年5月16日的实际工况进行48h的水力模拟和水龄计算,所得实际工况下管网各节点的水龄分布结果如图3所示。

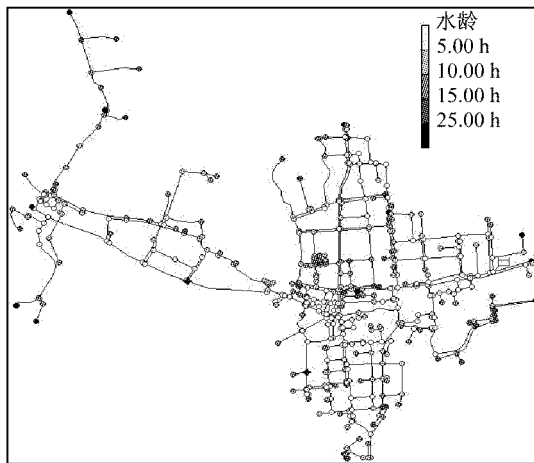


图3 实际工况下某镇管网水龄分布图

Fig.3 Water age distribution of networks in a town under the practical condition

结合水质监测点的具体位置,分析实际工况下某镇管网的水龄分布可以发现,该地区藏北路官桥村委会、穹窿山景区孙武书院、塔园路新旅程小区所在的管网末梢区域,以及花苑东路新华路交界所在非末端区域,管网水龄较长。

因此,基于减小管网节点水龄这个目标,采用所建模型,用Matlab优化求解,解得优化工况下,各供水接入点的用水量如表1所示,表2为优化前后各个监测点的水龄和压力情况:

从表2中可以发现,经过优化之后,该管网的综合水龄指数从31.65 h降为26.30 h,下降16.91%,

表1 某镇管网优化前后各水源接入点供水量对比

Tab.1 Comparison of water supply quantity of the access points in a town before and after optimization ($L \cdot s^{-1}$)

供水接入点	藏书日辉滨桥	谢村路	张思桥	金山路
实际工况	-131.148	-150.562	-229.024	-152.466
优化工况	-184.326 1	-273.349 2	-33.127	-109.529 1

表2 优化前后某镇管网监测节点的水龄和压力情况对比

Tab.2 Comparison of water age and pressure of monitoring nodes in networks in a town before and after optimization

监测节点	实际工况		优化工况	
	压力/m	水龄/h	压力/m	水龄/h
藏北路官桥村委会	26.76	14.738 4	29.97	14.681 9
钱家场	22.99	6.981 5	26.20	6.639 9
穹窿山景区孙武书院	9.05	35.760 7	12.26	35.642 1
藏书日辉滨桥	27.06	0	30.33	0
藏中路坦克部队	25.30	6.294 6	28.48	6.095 5
渔阳街公交首末站	23.19	1.055 3	25.41	0.915 5
灵天路木渎高级中学	27.58	5.383 3	29.83	6.438 1
花苑东路新华路交界	25.02	14.462 5	27.12	6.876 0
翠坊街实验中学	25.35	3.278 8	27.76	1.697 3
木东线木渎污水厂	25.78	5.819 4	27.87	3.695 6
宝带西路悦港医疗废物处理有限公司	17.86	18.368 0	18.54	22.356 9
塔园路新旅程小区	27.72	29.783 8	27.77	36.454 9
综合水龄指数/h	31.651 3		26.300 4	
管网压力合格率	98.74%		98.95%	

注:城镇供水压力 ≥ 0.10 MPa,管网压力合格率 $\geq 97\%$ 。

降低幅度较大,这说明经过水力调度,对各个供水节点的供水量进行合理的分配之后,管网的综合水质能得到改善,同时,各个监测节点的压力都有增大,在一定程度上,增大了供水的可靠性,由表2可见,经过优化后管网的压力合格率也上升。从水量优化分配结果看,该镇四个接水点的接入水量有较大调整,其中张思桥节点的接入水量有大幅降低,而谢村路节点的接入水量有较大增加。这是由于张思桥接入点位于管网边缘,显然增加位于管网中部的谢村路接入点水量更有利于节点水龄的优化分布,说明了研究结果的合理性。需要说明的是,由于该镇管网仅通过市区管网接入供水,其接入水量可通过阀门调节,可以具有更大的变化幅度,若将该研究应用于含多个水厂的多水源管网时,需进一步考虑各水厂的生产能力和稳定要求设置可供应水量的上下限。

图4可以更加直观地反映优化前后各监测节点的水龄变化,经过优化过后大部分监测节点水龄都有下降,但是下降的程度各有不同,翠坊街实验小学、木东线木渎污水厂、花苑东路新华路交界处等地水龄下降较多,而穹窿山景区孙武书院、藏北路官桥

村委会、藏中路坦克部队等地的水龄值下降程度有限;同时,可以发现宝带西路悦港医疗废物处理有限公司以及塔园路新旅程小区这两处监测节点处的水龄值反而增大了,结合这几处监测节点的流量和所处的位置可知,通过水力调度的方式,可以明显降低

非管网末梢节点处的水龄,而对于管网末梢的节点,水龄优化的效果有限,尤其是对于节点流量相对较小的节点,水龄仍然较高.图 5 和图 6 分别是某镇管网优化前后的水龄分布图.

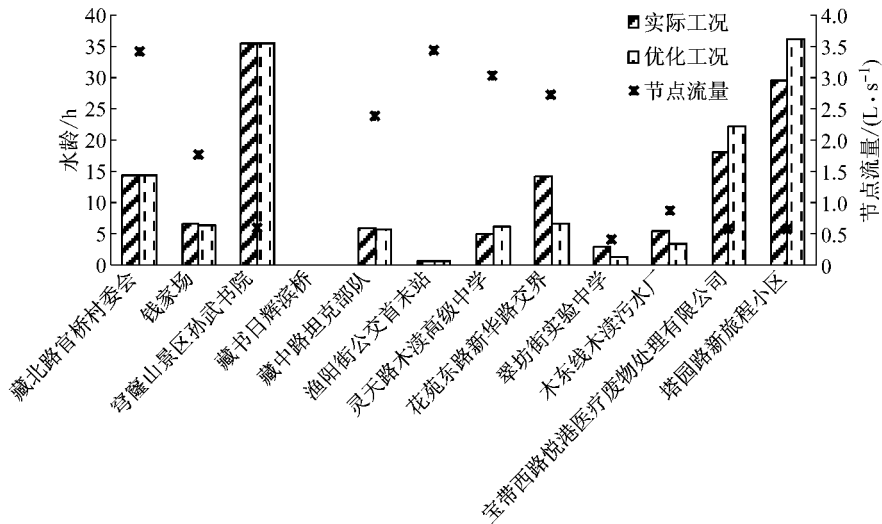


图 4 优化前后某镇管网各监测节点的水龄值比较图

Fig. 4 Comparison of water age of monitoring nodes in networks in a town before and after optimization

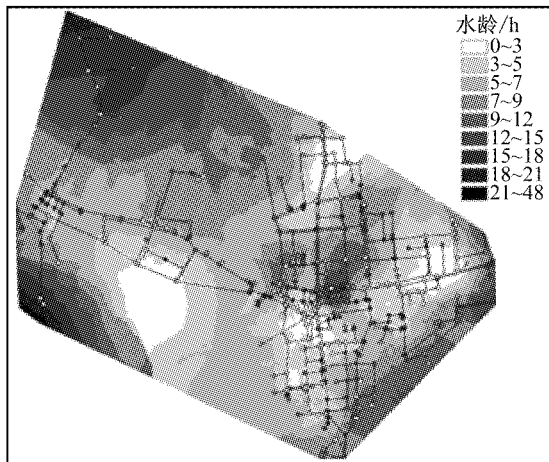


图 5 实际工况下某镇管网水龄分布图

Fig. 5 Water age distribution of networks in a town under the practical condition

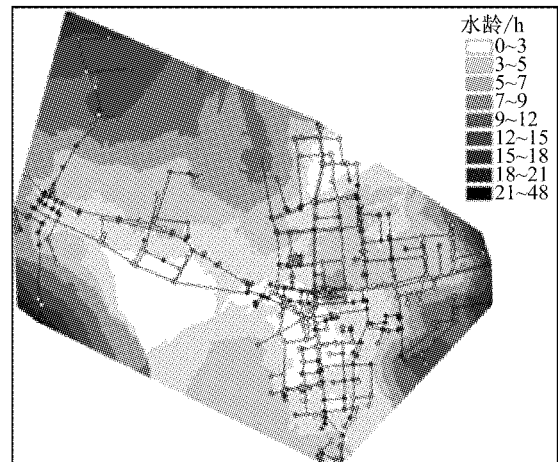


图 6 优化工况下某镇管网水龄分布图

Fig. 6 Water age distribution of networks in a town under the optimal condition

对比两张水龄分布图可以发现,经过水力调度优化后,在整个管网中,水龄特别大的区域明显减少,尤其是藏北路官桥村委会、穹窿山景区孙武书院所在的管网末梢区域以及花苑东路新华路交界所在非末端区域,水龄情况有显著好转,管网水质能够得到改善;但是,在管网末梢极个别节点的水龄仍然较高,单靠水力调度改善管网末梢的水龄的效果有限.实践表明,周期性冲洗管网能够提高管网水质,恢复管道的通水能力.通过冲洗,可以减少管道内物质的

沉积,提高管道水流速度,从而减少水流在管段内的停留时间,减少余氯的衰减^[13].因此,对于管网末梢的节点,尤其是用水量比较小的节点,可以考虑运用管段冲洗的方式减小节点水龄.

3 结论

管网的水龄可以作为评价管网水质的重要指标,分析供水管网的水龄对改善管网水质有很重要

的意义.通过分析管网不同区域内的水龄与水量的关系特征,提出了将管网综合水龄指数作为管网水质评价的新指标,并以某镇供水管网为研究实例对管网各水源供水量进行优化调度,得到了管网各水源水量水压的优化调度方案.通过比较优化前后整个供水管网的综合水龄情况可知,该方法能够有效改善管网的综合水龄,尤其是对于用水量大的用水节点有很明显的效果,但是对于位于管网末端,尤其是用水量相对较小的节点,单靠水力调度无法使得节点水龄有很明显的改善,可以考虑运用管段冲洗的方式减小节点水龄.

需要说明的是,某镇管网由 4 个供水节点直接接入主管网并从中引水,制水成本无明显差异,因此,在本次调度优化的过程中,忽略了输水制水的经济因素,仅考虑水质因素进行优化调度,而在后续的管网研究中,可进一步拓展到包括原水在内的整个管网系统,同时将经济因素和水质因素一起作为优化目标考虑,对供水管网进行多目标优化调度,得到供水管网的最佳运行状态.

参考文献:

- [1] 伍悦滨,赵洪宾,张海龙.用节点水龄量度给水管网的水质状况[J].给水排水,2002,28(5):36.
WU Yuebin, ZHAO Hongbin, ZHANG Hailong. Water quality status measured by water node age in distribution network[J]. Water and Wastewater Engineering, 2002,28(5):36.
- [2] 王永,刘遂庆,信昆仑,等.供水管网水龄的逐节点遍历简化算法[J].计算机工程与应用,2009,45(20):199.
WANG Yong, LIU Suiqing, XIN Kunlun, et al. Simplified and junction by junction algorithm to calculate water age in urban water supply and distribution network [J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(20):199.
- [3] 谈勇.饮用净水管网余氯与细菌总数的相关性研究[J].中国给水排水,2009,32(13):105.
TAN Yong. Research on correlation of residual chlorine and total bacterial count in water distribution networks[J]. China Water and Wastewater, 2009,32(13):105.
- [4] Savic DA, Walters GA, Schwab M. Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply [C]// Evolutionary Computing. Berlin: Springer, 1997: 227-235.
- [5] Lopez-Ibanez M, Devi Prasad T, Paechter B. Multi-objective optimisation of the pump scheduling problem using SPEA2 [C]//The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Miami: IEEE, 2005:435-442.
- [6] Barán B, Lüken CV, Sotelo A. Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies [J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(1): 39.
- [7] 杨芳,张宏伟,牛志广.城市供水管网节水状态下的优化调度[J].中国给水排水,2002,18(3):82.
YANG Fang, ZHANG Hongwei, NIU Zhiguang. Optimal scheduling of urban water supply networks under water saving condition[J]. China Water and Wastewater, 2002,18(3): 82.
- [8] 郑飞飞,信昆仑,刘遂庆.给水管网耦合优化调度模型的建立及应用[J].中国给水排水,2008,24(17):102.
ZHENG Feifei, XIN Kunlun, LIU Suiqing. Establishment and application of coupled model for optimal operation of water supply network[J]. China Water and Wastewater, 2008, 24(17): 102.
- [9] 胡益.基于水压和水质目标的给水管网优化调度的研究[D].长沙:湖南大学,2009.
HU Yi. Based on water pressure and water quality objectives of the water distribution network optimization study [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [10] 蒋承杰.配水管网水龄分析与管网水质状况评价体系的探讨[D].杭州:浙江大学,2007.
JIANG Chengjie. The age of water distribution network's analysis and the appraisal system with water quality conditions discussion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [11] 刘广奇,莫耀,王晨,等.多目标决策下的城市供水系统规划研究[C]//多元与包容——2012中国城市规划年会论文集(07城市工程规划).昆明:中国城市规划学会,2012:6-11
LIU Guangqi, MO Li, WANG Chen, et al. Research on urban water supply system planning based on multi-objective decision [C]// Diversity and inclusion: essays on the annual conference of the 2012 China Urban Planning Conference (07 Urban Engineering Planning). Kunming: Urban Planning Society of China, 2012:6-11
- [12] 黄守渤.供水调度决策多目标状态评价体系研究[D].上海:同济大学,2008.
HUANG Shoubo. The study on multi-objective state assessment system of water supply schedule decision [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [13] 施银焕. M市供水管网余氯衰减模型的建立与校正研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2013.
SHI Yinhan. Building and calibration of water supply networks residual chlorine decay modeling in M city [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.