

供水管网优化调度决策支持系统开发与应用

王 强¹ 刘遂庆²

(1 北京市城市规划设计研究院市政规划所,北京 100045; 2 同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要 供水管网优化调度的目标是运用数据采集、优化决策支持和调度执行等信息化技术,安全可靠地将符合流量、压力和水质要求的水供应给用户。供水管网优化调度决策支持系统包括供水系统的模拟、用水量预测、优化调度决策和运行状态评估。该决策支持系统包括宏观水力模型、微观水力模型、水质模型、考虑供水经济性和水质安全性的多目标优化决策模型。采用单目标优化决策模型与多目标评估体系相结合的方法来考虑供水经济性和水质安全性,开发了供水管网优化调度决策系统,并进行了实践应用。

关键词 供水管网 优化调度 决策支持系统 单目标决策 多目标评估

Development and application of decision support system for water distribution networks optimization

Wang Qiang¹, Liu Suiqing²

(1. Municipal Planning Department, Beijing Municipal Institute of City Planning and Design, Beijing 100045, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The aim of water distribution networks optimization is to supply water safely and reliably to users, according to requirements of the flow, pressure and water quality, on the basis of information technology which includes data acquisition, operational decision support and the execution system. The decision support system (DSS) consists of water supply system simulation, water demand prediction, optimization and operation status evaluation. In this paper, theories, technical development and application of the DSS are discussed, which include macro hydraulic model, micro hydraulic model, water quality model, and multiple objectives optimization model which includes the costs of water supply and the security of water quality. In this paper, aiming at the economy of water supply and the safety of water quality, the method of combination of single objective optimization model and multiple objectives evaluation system is adopted and the water supply optimization system is developed and put into practical application.

Keywords: Water distribution networks; Optimization; Decision support system; Single objective decision; Multiple objectives evaluation

随着经济的发展,人们对供水可靠性、安全性、经济性和运行管理提出了更高的要求^[1,2]。供水企业需要通过供水优化调度系统,逐步提高供水管理水平和水平,供水优化调度系统的建设被列为

“国家供水行业 2010 年技术进步规划及 2020 年远景目标”内容之一,已成为供水企业信息化建设发展的必然趋势^[3]。然而,目前国内大多数城市供水系统调度仍然以传统的人工经验调度方式为主,供水

管网调度决策和管理的水平较低,难以满足供水可靠性、安全性和经济性的优化目标。

针对我国现状,本文提出采用单目标决策数学模型与多目标评估体系相结合建立供水优化调度决策支持系统的解决方案。首先在供水水力模型基础上,建立以供水运行总费用最小为单目标的优化决策模型;然后建立供水调度节点压力、节点水龄、管段流速等多目标综合评估系统对若干个单目标方案分别进行评价,最终确定最优调度方案,从而确保供水的可靠性、安全性和经济性^[6]。该决策支持系统于2006年6月在FS市供水管网中进行试运行,系统决策的调度方案在供水费用和水质安全等方面均优于人工调度方案。

1 决策支持系统理论

从广义来说,供水优化调度系统主要由四部分组成^[2,3]:数据采集与通信网络系统;数据库系统,包括:地理信息系统(GIS)、管网模型数据,各检测点的压力、流量、水质等实时状态数据,调度决策数据;调度决策支持系统,具有供水管网动态模拟、用水量预测、调度优化决策、调度状态评估等功能;调度执行设施。其中,供水调度决策支持系统是供水优化调度的核心组成部分。

决策支持系统是面向决策环境的非结构化部分,以改进决策结果的最终效果为目的,辅助决策者进行方案制定的系统^[7,8]。供水调度决策支持系统涉及供水可靠性、安全性、经济性等方面的内容,能够利用来自数据库的静态和动态信息,进行供水管网动态模拟、用水量预测,按照目标函数和约束条件求解调度模型,系统决策方案分为人工方案、离线预案、在线方案等多种形式。

1.1 管网水力模型

管网水力模型主要分为宏观模型和微观模型。宏观模型是一种数据相关性统计模型,利用“黑箱理论”的基本思想,来寻求管网中不同区域间的流量、压力变化的关系和规律^[9]。宏观模型认为管网系统的总用水量、各供水泵站供水量以及各节点用水量在一天内各时段按相同的比例因子变化^[10,11]。微观模型建立的思想主要是从供水管网的拓扑关系出发,依据管道管径、管长、管材及节点用水量等主要参数,构造出拓扑结构模型^[2]。该模型的基本数学

方程包括质量平衡方程和能量平衡方程。

1.2 管网水质模型

供水管网水质模型是跟踪管网系统中水质成分轨迹的数值方法,是以管网微观模型为基础的。其理论研究包括模拟非反应物质或者具有一定衰减反应的物质在管网中浓度的变化,模拟管壁反应、细菌生长、三卤甲烷生成以及不同消毒剂的输送、扩散和反应过程等^[12]。目前研究比较成熟的水质模型主要以管网中物质衰减模型为主。利用管网中动态水质模拟,理论上可以得到某时刻节点的水质浓度。

1.3 管网调度决策模型

从供水优化调度的基本概念可知,供水经济性和水质安全性是供水管网科学调度的两个重要决策目标。由此确定的多目标优化决策模型的基本表达式为:

$$\text{Min } F = \text{Min} ({}_1 f_1 + {}_2 f_2) = \text{Min} \left\{ \begin{aligned} & 1 \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W d_{it} Q_{it} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{M_i} a_{ijt} d_{2ijt} Q_{ijt} H_{ijt} \right] \\ & + 2 \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \min(0, \min(C_{it} - \bar{C}_{it}, \bar{C}_{it} - C_{it}))^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 f_1 ——供水经济性指标;

f_2 ——水质安全性指标^[13];

${}_1, {}_2$ ——供水经济性和水质安全性的权重系数,

且 ${}_1 + {}_2 = 1$;

d_{it} ——第 i 净水厂在 t 时段内的制水成本,元/ m^3 ;

Q_{it} ——第 i 净水厂在 t 时段内的处理水量, m^3 ;

W ——净水厂数量;

T ——供水调度时段数;

a_{ijt} —— i 泵站 j 水泵在 t 时段的开关状态,水泵运行取 1,否则取 0;

d_{2ijt} —— i 泵站 j 水泵在 t 时段单位扬程单位供水量的电费,元/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m})$;

Q_{ijt} —— i 泵站 j 水泵在 t 时段的出水流量, m^3/h ;

H_{ijt} —— i 泵站 j 水泵在 t 时段的扬程, m ;

M_i —— i 泵站内水泵台数;

P ——供水泵站数量;

C_{it} ——节点 i 在 t 时刻的物质浓度, mg/L ;

C_{it} ——节点 i 在 t 时刻允许的最小物质浓度, mg/L;

\bar{C}_{it} ——节点 i 在 t 时刻允许的最大物质浓度, mg/L;

N ——节点数量。

然而,在国内往往难以直接求解和应用上述多目标调度决策模型,其主要原因在于国内大多数城市管网中没有足够的水质监测值,难以建立准确的管网水质模型,导致节点水质优化目标和相关约束条件不能实现。为此,本文提出首先满足供水经济性的优化目标,然后通过建立多目标综合评估系统来保证供水调度在水质安全性等方面的多目标优化。单目标优化决策模型可以采用遗传算法求解,多目标综合评估采用多级模糊评估方法。

1.4 调度决策支持多目标综合评估系统

根据供水调度对供水可靠性、安全性和经济性的要求,拟从水力、水质和供水费用等三方面对管网运行状态进行综合评估^[14]。具体选用的评估指标为:节点压力、节点压力波动、节点水龄、管段流速和供水费用(包括水处理费用和泵站电费)。

其中需要说明的是水质指标。目前国内绝大多数供水管网的水质为定期人工检测,没有实现在线连续自动监测,因此难以获得对应工况下完备的数据来建立和校核管网水质数学模型。为了开展工作,本文选用节点水龄作为水质指标,节点水龄是指水从水源点流到管网某节点的时间,它表示水的“新鲜”或“陈旧”程度,用于综合反映管网水质情况。在管网水力模型基础上,各节点的水龄的计算简单易行。

该系统采用模糊二级综合评估方法,使用的评语集为: $V = \{优秀,良好,合格,不合格\}$ 。具体评估步骤如下:

(1) 一级评估。首先,构建节点压力子集 P ,节点压力波动子集 DP ,节点水龄子集 A ,管段流速子集 S ,泵站供水费用子集 C 。然后,根据每个子集的评估标准确定各评判矩阵 $R_P, R_{DP}, R_A, R_S, R_C$ 和各权重向量集 $W_P, W_{DP}, W_A, W_S, W_C$ 。其中,各节点压力、压力波动、水龄评估子集的权重系数根据节点流量与传输流量之和来确定;各管段流速评估子集的权重系

数根据各管段的体积来确定;各泵站供水费用评估子集的权重系数按各泵站供水量来确定。

利用各子集的评判矩阵和权重向量集,采用 (\cdot, \cdot) 算子,可以得到一级评价结果向量,即:

$$\begin{aligned} D_1 &= W_P \circ R_P = \{d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}\} \\ D_2 &= W_{DP} \circ R_{DP} = \{d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}\} \\ D_3 &= W_A \circ R_A = \{d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{34}\} \\ D_4 &= W_S \circ R_S = \{d_{41}, d_{42}, d_{43}, d_{44}\} \\ D_5 &= W_C \circ R_C = \{d_{51}, d_{52}, d_{53}, d_{54}\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 d_{ij} ——评价向量各因数值, $i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 4$;

D_1 ——节点压力子集的评价向量;

D_2 ——节点压力波动子集的评价向量;

D_3 ——节点水龄子集的评价向量;

D_4 ——管段流速子集的评价向量;

D_5 ——泵站供水费用子集的评价向量。

(2) 二级评估。首先,将各子集的一级评价结果向量合成为二级评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 R ——所有指标的综合评价矩阵。

然后,由专家打分确定节点压力、节点压力波动、节点水龄、管段流速、泵站供水费用五类指标在供水调度绩效评价中分别占有的权重:

$$W = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5\} \quad (4)$$

式中 W ——综合权重子集,权重值 w_i ($i = 1, 2, \dots, 5$)之和应该为1。

最终利用综合评价矩阵 R 和综合权重子集 W ,可以得到二级评价结果向量:

$$D = W \circ R = \{d_1, d_2, d_3, d_4\} \quad (5)$$

式中 D ——综合评价向量。

向量 D 的计算采用的是 (\cdot, \cdot) 算子,最后对

向量 D 按最大隶属度原则判断,便可以得到最终的评价结果。

2 调度决策支持系统设计与开发

2.1 工作流程(见图 1)

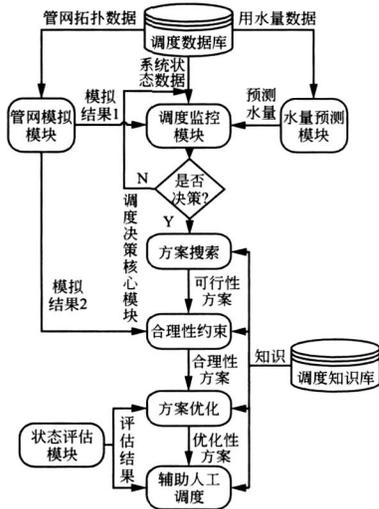


图 1 调度决策支持系统流程

在大多数时间系统会对管网运行状态进行实时跟踪监控。每个调度时段初期,系统会根据数据库中的动态数据进行是否决策的判断:在已知管网和泵站现有状态的情况下,利用预测水量进行下一个或下几个时段的管网状态模拟计算,如果计算得到未来时段主控点的压力或压力趋势均在控制范围内,则无需进行调度决策,流程返回到调度监控模块,继续下一个调度事件的监测;如果未来时段主控点的压力趋势超出了规定的上下限,说明未来时段由于用水量的增加或减少,管网将处于不可靠供水状态,则需要及时进行调度决策,产生新的水泵开关策略,使管网系统运行控制在可行、合理、优化的范围内。调度方案的产生是按如下三个步骤来进行的。

(1) 根据现有水泵运行状态搜索所有可行性方案。可行性方案指的是除检修以外所有可操作水泵组合而成的方案。如果采取缩短调度时段,基于水泵现有状态以及专家知识库进行启发搜索等方法,系统对水泵操作方案的搜索空间大大减少,这样有利于避免水泵方案多重组合的复杂情况,提高调度方案的决策效率。

(2) 对可行性方案进行合理性约束。合理性约束主要考虑管网水力条件约束、泵站水力条件约束、主控点压力要求约束、水泵操作合理性约束、清水池水位约束、各水处理流程间均衡性约束等。其中管网和泵站的水力约束,管网中主控点压力的约束均是通过管网微观水力模拟来实现的,其他约束条件通过调度知识库中的专家知识来控制。

(3) 对可行、合理的方案进行优化计算。即在求解以供水运行费用为优化目标函数的基础上,运用多目标综合评估系统对各方案进行优选,从而进一步保障供水可靠性、安全性和经济性。

最后决策支持系统输出可行、合理和优化的方案,提供人工参考,进行供水调度决策的支持。

2.2 软件结构

供水调度决策支持系统软件结构设计总体分为数据输入、优化决策和结果输出三部分^[15],如图 2 所示。

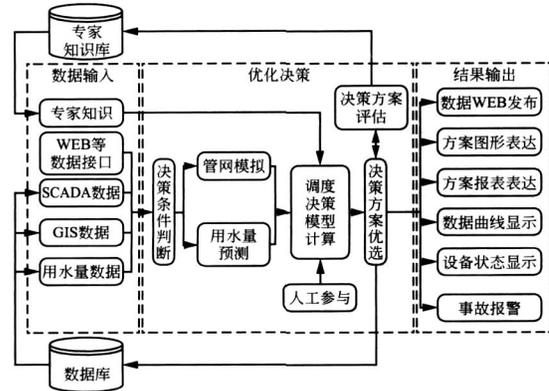
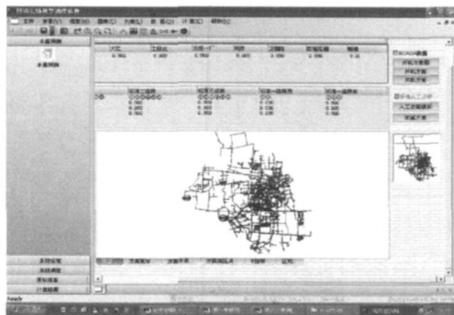


图 2 供水调度决策支持系统软件结构

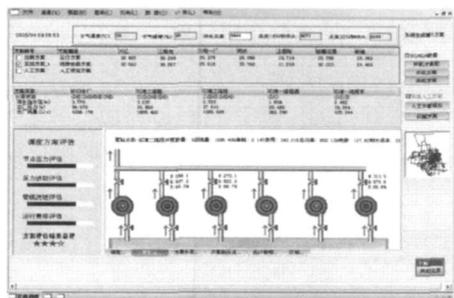
2.3 软件开发

在软件工作流程分析和结构设计基础上,进行了软件开发。开发工具采用 Visual Studio C++ 6.0^[16,17],数据库系统为 MS SQL Server 2000,操作系统为 Windows 2000/XP。软件界面如图 3 所示。

调度决策支持软件具备的主要功能包括:管网动态水力模拟、用水量离线/在线预测、多目标综合评估、离线/在线调度决策、报表输出以及 WEB 发布等。



a 管网微观模拟



b 在线调度

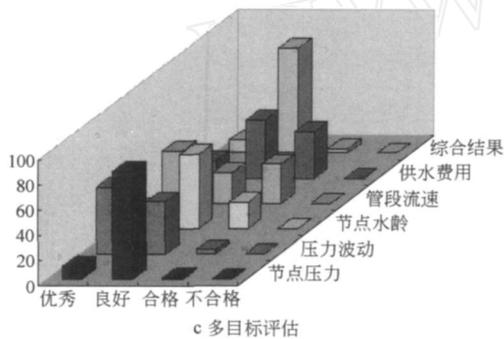


图3 供水调度决策支持系统软件界面

3 应用实例

FS 市水业集团公司是国内较早进行供水信

息化技术研究和应用的单位之一。自 1989 年以来,公司先后完成了营业信息管理系统、供水管网地理信息系统 (GIS)、供水管网数据采集与监控 (SCADA) 系统、客户服务系统、工作流程系统、供水管网水力模型以及门户网站等建设,为供水调度决策支持系统的研究、开发与应用奠定了良好的基础。

多年来,FS 市供水调度一直以传统的人工经验调度方式为主,主要依据是区域水压分布,利用增加或减少水泵开启的台数,使管网中各区域水的压力保持在经验设定的最佳服务范围之内。2005 年 6 月,供水调度决策支持系统在 FS 市供水管网中进行了试运行。

为了验证调度决策系统的有效性,特别选取 2005 年具有代表性的 7 天,即 6 月 5 日(星期日)、7 月 1 日(星期五)、9 月 3 日(星期六)、9 月 7 日(星期三)、9 月 12 日(星期一)、9 月 13 日(星期二)、9 月 15 日(星期四),将这 7 天的系统调度方案与人工调度方案进行供水经济性和水质安全性的比较。

表 1 中列出了各天系统决策方案和人工方案的供水量及总供水费用。从中可以得出结论:在各天供水量基本相同情况下,系统决策方案供水总费用均低于人工方案。

表 2 中列出了两类方案在多目标评估体系中水质目标评估的结果,列出了在一天 96 个调度时段(调度时段为 15 min)内,评估结果出现优秀、良好、合格、不合格的时段次数。显然,系统决策调度大多数方案水质评估为良好等级,部分为优秀等级;人工调度大多数方案水质评估为合格等级,没有优秀等

表 1 系统决策与人工调度供水方案经济性比较

日期	系统决策		人工调度		供水量差额/ m ³	费用差额/ 元
	供水量/ m ³	费用/ 元	供水量/ m ³	费用/ 元		
0605	616 866. 85	140 781. 57	616 866. 89	146 987. 02	0. 05	- 6 205. 45
0701	647 973. 90	145 339. 55	647 973. 95	150 970. 12	0. 05	- 5 630. 57
0903	685 092. 83	156 340. 10	685 092. 87	161 227. 68	0. 03	- 4 887. 59
0907	671 246. 98	152 063. 99	671 247. 01	156 825. 50	0. 03	- 4 761. 51
0912	692 755. 73	159 816. 56	692 755. 70	163 118. 71	0. 03	- 3 302. 16
0913	698 279. 25	160 188. 12	698 279. 25	163 935. 48	0. 01	- 3 747. 36
0915	710 325. 63	161 359. 69	710 325. 64	166 029. 82	0. 01	- 4 670. 13

表 2 系统决策与人工调度供水方案水质评估结果比较

日期	系统决策水质目标				人工调度水质目标			
	评估(时段数/日)				评估(时段数/日)			
	优秀	良好	合格	不合格	优秀	良好	合格	不合格
0605	5	78	13	0	0	23	73	0
0701	8	68	20	0	0	32	64	0
0903	10	71	15	0	0	30	65	1
0907	15	65	16	0	0	28	68	0
0912	6	80	10	0	0	20	76	0
0913	9	56	31	0	0	45	50	1
0915	15	62	19	0	0	58	38	0

级。从中可以得出结论:在这 7 天的供水水质安全性方面,系统决策方案优于人工方案。

4 结论与建议

本文将供水费用单目标优化数学模型与供水可靠性、安全性和经济性多目标综合评估体系相结合,建立了供水优化调度决策支持系统。该系统在 FS 市供水管网中成功应用,提高了 FS 市水业集团公司的供水管理水平。实践表明本文提出的供水调度决策支持系统的理论和方法具有合理性和实用性。

对于供水优化调度决策支持系统的研究,今后将在以下几个方面继续开展工作。

(1) 开发通用性系统平台,进一步考虑利用管网中的设施进行供水区域调度,例如主控阀门远程调节、储水池水量调度等。

(2) 继续完善硬件设施的建设,如改进调度决策支持系统的配套硬件设施;增加管网中水量和水质方面的监测设施;通过先进技术手段提高监测数据的稳定性和准确性。

(3) 对供水状态仿真系统进行重大改进和扩展,建立供水管网水质模型、水资源模型和水处理模型,由供水管网水力模拟扩展到取水、净水和供水的全系统状态仿真。

(4) 采用分布式计算技术,努力提高调度决策支持模型的求解效率。

(5) 在调度决策过程中引入专家决策支持系统,研究供水事故的自动侦测技术,实现管网水量漏失和爆管预测功能,研究建立供水安全预警系统,建立和完善供水突发事件应急体系。

参考文献

- 汪光焘,肖绍雍,宋仁元,等.城市供水行业 2000 年技术进步发展规划.北京:中国建筑工业出版社,1993
- 严煦世,刘遂庆.给水排水管网系统.北京:中国建筑工业出版社,2002
- 刘遂庆.供水系统科学调度技术与应用.见:中国城镇供水协会城市供水行业 2010 年技术进步发展规划及 2020 年远景目标.北京:中国建筑工业出版社,2005.116~129
- 孙伟,赵洪宾.城市供水系统宏观优化调度建模问题.见:全国青年管理科学与系统科学论文集(第 2 卷).1993.16~19
- 周建华,赵洪宾.城市给水管网系统所面临的问题及对策.中国给水排水,2002,18(11):30~33
- 王强.供水管网科学调度决策支持系统理论和应用研究:[学位论文].上海:同济大学,2006
- George M M 著.21 世纪的决策支持系统.朱岩,肖勇波译.北京:清华大学出版社,2002
- 陈文伟.决策支持系统教程.北京:清华大学出版社,2004
- Walski T,Chase D V,Savic D,et al. Advanced water distribution modeling and management. Waterbury, Connecticut: Haestad Press,2001
- Demoyer R, Horwitz L B. Macroscopic distribution-system modeling. J AWWA,1975,67(7):377~384
- Coulbeck B, Cleland D M, Orr C H. Advances in modeling of water distribution systems for optimized control applications. In: Proc IEEE Conf Control 85. Cambridge: Cambridge University, 1985.286~291
- 童祯恭.给水管网水质模拟与安全分析方法和应用研究:[学位论文].上海:同济大学,2005
- Sakarya B A, Mays L W. Optimal operation of water distribution pumps considering water quality. J Water Resour Plng and Mgmt,2000,126(4):210~220
- 伍悦宾.给水管网系统性能评价方法的研究:[学位论文].哈尔滨:哈尔滨建筑大学,2000
- 王强,刘遂庆,周建萍,等.供水管网调度系统信息化建设研究.工业用水与废水,2005,36(5):1~3
- David J K, Scot W, George S. Programming Visual C++ 6.0 技术内幕.第 5 版.希望图书创作室译.北京:希望电子出版社,1999
- Eckel B. C++ 编程思想.刘宇田,邢大红,孙慧杰等译.北京:机械工业出版社,2000

☎ 电话:(010)88073695

E-mail:wq2018@163.com

收稿日期:2008-03-12

修回日期:2008-10-28