城市供水管道失效后果评价模型

郑成志[1], 高金良[1], 陈 兵[2], 何文杰[1,3]

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, buye3000@163.com; 2. 华南理工大学 环境科学与工程学院, 510006 广州; 3. 天津市自来水集团有限公司, 300040 天津)

摘 要: 为评价城市供水管道发生事故关阀后管网的运行状态,建立了供水管道失效后果评价模型. 该模型为二级评价模型,以影响区流量减少情况、非影响区流量减少情况及压力降低情况为3个评价指标;评价模型中所有变量都是节点的属性值,从而易于借助水力模型取值;供水管道失效后果评价模型基于供水管道失效水力模型构建,该水力模型综合运用节点流量初次重分配、节点流量压力驱动自适应调整的方法,并以遗传算法求解. 将模型在算例管网中模拟实验,模型应用效果良好,并且根据模型模拟结果,能有效分析管网中阀门布置的合理性及管道担负的角色,可有针对性地提出降低管道失效后果的措施.

关键词: 供水管网;供水管道事故;风险评价;失效后果评价模型

中图分类号: TU991.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0056-05

The failure consequence evaluation model of urban water supply pipeline

ZHENG Cheng-zhi[1], GAO Jin-liang[1], CHEN Bing[2], HE Wen-jie[1,3]

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, buye3000@163.com; 2. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, 510006 Guangzhou, China; 3. Tianjin Water Works Group Co. Ltd., 300040 Tianjin, China)

Abstract: To evaluate the working state after turning off some valves in an urban water distribution system (WDS) when there was a pipeline breakage, this paper established a failure consequence evaluation model, in which the node demands decrease of affected pipelines, the node demands decrease and the pressure reduction of non-affected pipelines were taken as three estimate indexes. And because all the variables were the node's properties, their values were easier to get from the hydraulic model. As a basis for the model, a micro-hydraulic model named water supply pipeline failure hydraulic model was established. It redistributed node demands firstly, and then automatically adjusted the node demands under node pressure, and was calculated by genetic algorithm(GA). By the simulation experiments in a small water distribution system, it showed that the assessment model worked well. According to the results, the reasonableness of the valve's arrangement and the role of some pipelines in the network can be effectively analyzed.

Key words: water distribution system; water supply pipeline breakage; risk assessment; failure consequence evaluation model

城市供水管道发生事故后,现阶段快速处理事故的办法是立即采取关阀并在完成抢修后恢复通水. 针对供水管网事故关阀的最优方案研究,目前国内开发出了基于深度优先搜索法[1]和广度优先搜索法[2]的实用关阀程序. 在事故后节点流量的确定方面,Rossman[3]提出了节点实际流量与压力的关系式,该式简单宜用,但按照该关系式节点实际用水量随压力增大而无限增大,这与实际情况不符. Ang等[4]提出节点实际供水量与压力的分段函数式,比较接近实际,周建华等[5]通过实验确立了经验函数式,这些为事故关阀后管网平差计算提供了理论与实验依据.

收稿日期: 2011-01-14.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908064/E080403).
作者简介: 郑成志(1985—),男,博士研究生;
何文杰(1956—),男,教授级高工,博士生导师.

虽然实用关阀程序与管网事故平差研究日趋深入,但综合起来应用于管网风险评价的研究还很缺乏. 事故后的供水管网处于非正常状态,宁冉等[6]曾用模糊评判法评价了给水管网事故的影响,评价指标比较全面,评价状态是管道事故关阀前的,但该评价模型中的参数因主观意见不同取值差异大,并且评价指标取值困难,没有充分发挥微观水力模型的作用. 本研究拟建立一个充分发挥微观水力模型作用的评价模型,从风险率理论[7]角度对事故关阀后的管网进行城市供水管道失效后果评价,弥补相应领域研究空白,克服常规评价模型的一些弊端,同城市供水管道事故率研究一起成为供水管道事故风险率的重要组成部分,有效提升城市供水管道的管理水平.

1　城市供水管道失效后果评价模型的建立

城市供水管网中发生事故后,现阶段快速降低事故损失的方法是立即关阀并进行抢修,关阀一般可在接到事故报告内的较短时间内完成,而事故关阀后到恢复供水一般要经过一段时间,这段时间内管网供水状况发生了变化,其中有部分区域会完全停水,部分区域只能实现低压供水,管道失效后果评价就是对此时的管网运行状态进行评估,评价管道事故下的管网服务损失程度.

对事故关阀后的管网运行状态进行评估,首先要正确地实现该状态下的管网水力仿真,所以,整个模型的建立要以供水管道失效水力模型为基础,借助于该水力模型模拟的参数开展供水管道失效后果评价模型的研究.

1.1　供水管道失效水力模型的构建

当某一供水管道发生事故时,采用深度优先搜索法实现阀门最优关闭,目的是使停水区域最小,关闭的阀门数量最少. 定义阀门关闭后造成的停水管段为影响区,其余管段为非影响区. 影响区内的管道由于关阀的原因失去输配水作用,称之为管道失效.

1.1.1　事故关阀后节点流量的初次重分配

将影响区管段的节点定义为影响区节点,其余节点定义为非影响区节点. 在管网平差计算中,节点流量是沿线流量的转化值,其原理是求出一个沿线不变的折算流量,使其产生的水头损失等于实际上沿线变化流量产生的水头损失. 在进行关阀后的管网水力模拟时,如果由于关阀使某个节点成为影响区管段的节点,并且也是非影响区管段的节点,传统的直接将该节点的节点流量设置为 0 的方法将与实际情况相背离,这些节点的节点流量可以根据与其相连的管段分成几个部分,关阀后节点流量可以根据沿线流量转化为节点流量的原理重新分配. 对任意一个这些节点,其节点流量初次重分配的值是原节点流量值减去其中属于失效管道的部分.

1.1.2　节点流量的压力驱动自适应调整

管道事故的关阀措施会造成整个管网系统用水量的变化,从而造成管网压力的变化. 传统水力模型假定节点流量为定值,而实际上节点流量是节点压力的函数,并非恒定,节点流量经过初次重分配后,再通过节点压力的自适应调整才能与实际流量更加吻合. 在总结以往研究成果的基础上[3-5],确定节点流量值,即

$$q_{ip} = F(h_{ip}) = \begin{cases} q_{i0}, & h_{ip} \geqslant h_{i0}; \\ q_{i0}\left(\dfrac{h_{ip}}{h_{i0}}\right)^{0.5}, & f \leqslant h_{ip} < h_{i0}; \\ q_{i0}\left(\dfrac{f}{h_{i0}}\right)^{0.5}\sin(\pi h_{ip}/2f), & x_i \leqslant h_{ip} < f; \\ q_{i0}\left(\dfrac{f}{h_{i0}}\right)^{0.5} a_i h_{ip}^2, & 0 < h_{ip} < x_i; \\ 0, & h_{ip} \leqslant 0. \end{cases}$$

式中: i 表示节点编号; q_{ip} 表示关阀后节点 i 的自适应调整流量(L/s); q_{i0} 表示关阀后节点 i 初次重分配的节点流量(L/s); h_{i0} 表示正常供水节点 i 的压力(kPa); h_{ip} 表示关阀后供水节点 i 的压力(kPa); f 表示整个管网要求的最小服务水头(kPa); x_i 表示节点 i 的最小供水水头(kPa); a_i 表示节点 i 的系数, $a_i = \dfrac{\sin(\pi x_i/2f)}{x_i^2}$.

1.1.3　供水管道失效水力模型的确立

经过节点流量的初次重分配以及压力驱动自适应调整,结合传统的管网微观水力模型,确立供水管道失效水力模型为

$$\begin{cases} \sum_{j \in S_i} Q_j + q_{ip} = 0, & i = 1,2,\cdots,J; \\ H_{Fj} - H_{Tj} = 10 s_j Q_j^n - h_{pj}, & j = 1,2,\cdots,P; \\ q_{ip} = F(h_{ip}). \end{cases}$$

式中: j 表示管段编号; P 表示管段数目; J 表示节点数目; Q_j 表示管段 j 的转输流量(L/s); q_i 表示节点 i 的节点流量(L/s); H_{Fj}、H_{Tj} 分别表示管段 j 起点和终点的节点压力(kPa); S_i 表示以节点 i 为终点的管段集合; s_j 表示管段 j 的摩阻系数; h_{pj} 表示管段 j 上增加的压力(kPa).

该水力模型为多维非线性模型,研究采用遗

传算法求解.

1.2 供水管道失效后果评价模型的构建

研究在构建模型时预实现评价模型中变量取值的微观化、充分发挥微观水力模型作用的目的,在这个思路下构建模型过程中发现模型表达式已比较复杂,作为这种变量微观取值综合评价模型的尝试,全面考虑管道失效后水力状况,研究以影响区节点流量减少情况、非影响区节点流量减少情况、非影响区节点压力降低情况作为 3 个评价指标.

结合综合评价理论[8-9],首先建立一级评价模式

$$V_{p0} = \lambda_1 \sum_{i=1}^{m} | \Delta q_i | + \lambda_2 \sum_{j=1}^{n} | \Delta q_j | + \lambda_3 \sum_{j=1}^{n} | \Delta h_j | /10. \quad (1)$$

式中:V_{p0} 表示管道 p 对应的失效后果值,无量纲;λ_1、λ_2、λ_3 表示对应影响区节点流量减少情况、非影响区节点流量减少情况、非影响区节点压力降低情况的权重,并且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$;$\Delta q_i$ 表示影响区第 i 个节点流量减少量(L/s);Δq_j 表示非影响区第 j 个节点流量减少量(L/s);Δh_j 表示非影响区第 j 个节点压力降低量(kPa);m 表示影响区节点数量;n 表示非影响区节点数量,$m + n = J$.

为得到二级因素权重,对节点赋予重要系数,将用户重要程度转化为节点重要系数,这样各节点或者说各二级因素有了各自的权重. 式(1)可以转变为

$$V_p = \frac{\lambda_1 \sum_{i=1}^{m} (\gamma_i | \Delta q_i |)}{\sum_{i=1}^{m} \gamma_i} + \frac{\lambda_2 \sum_{j=1}^{n} (\zeta_j | \Delta q_j |)}{\sum_{j=1}^{n} \zeta_j} + \frac{\lambda_3 \sum_{j=1}^{n} (\zeta_j | \Delta h_j | /10)}{\sum_{j=1}^{n} \zeta_j}. \quad (2)$$

式中:V_p 表示管道 p 的失效后果值,无量纲;γ_i 表示影响区第 i 个节点的重要程度系数;ζ_j 表示非影响区第 j 个节点的重要程度系数.

由于流量和压力的量纲不同,将非影响区流量的减少和压力的降低视为同等重要,初步得到一级权重,即

$$\lambda_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m} \gamma_i}{\sum_{i=1}^{m} \gamma_i + \sum_{j=1}^{n} \zeta_j};$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{2} \frac{\sum_{j=1}^{n} \zeta_j}{\sum_{i=1}^{m} \gamma_i + \sum_{j=1}^{n} \zeta_j}. \quad (3)$$

考虑某些情况致使压力低于要求的最小服务水头,甚至低于最小供水水头时,用户从满足用水降低为低量用水甚至无法用水,管道失效后果产生质的差别,采用大于 1 的修正系数放大失效后果进行修正. 经模拟证实,依据压力降低的程度越大该修正系数的取值越大的原则,修正系数在 1 ~10 取值时模拟结果差异较小. 将式(3)代入式(2),并用修正系数适当修正,确立供水管道失效后果二级评价模型为

$$V_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m} \gamma_i + \sum_{j=1}^{n} \zeta_j} [\sum_{i=1}^{m} (\gamma_i | \Delta q_i |) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} (\zeta_j | \Delta q_j |) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n}{}_j (\zeta_j b_j | \Delta h_j | /10)].$$

b_j 表示非影响区第 j 个节点因压力降低的修正系数.

该模型的 3 大评价指标有统一性,变量均是针对节点的属性,易于实现评价模型中变量的取值,同时充分发挥了微观水力模型的作用,即实现了评价对象的微观化取值.

2 模拟实验与结果分析

2.1 管网基本介绍

算例管网采用两个水源,现状运行工况下水源 1 出厂流量为 326.66 L/s, 泵后绝对水压为 388.0 kPa,水源 2 出厂流量为 590.73 L/s,泵后绝对水压为 395.4 kPa. 管网节点数量为 38 个,管段数量为 53 个,管网拓扑关系见图 1,相关属性信息见表 1.

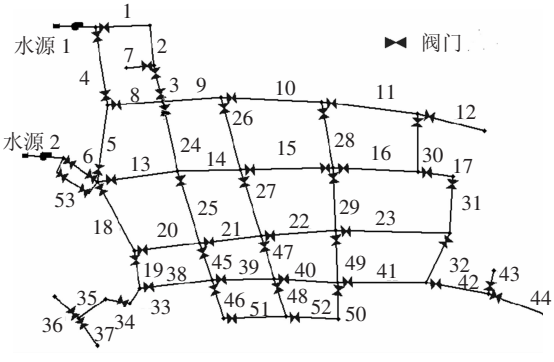

图 1 算例管网拓扑图

表 1　算例管网管道属性

管道编号	管长 m	管径 D mm	管道编号	管长 m	管径 D mm	管道编号	管长 m	管径 D mm	管道编号	管长 m	管径 D mm
1	630	500	14	720	600	27	1 040	500	40	980	400
2	443	500	15	1 370	500	28	980	400	41	1 160	400
3	412	500	16	920	400	29	960	400	42	640	300
4	862	500	17	430	300	30	870	300	43	310	200
5	970	500	18	1 100	600	31	910	300	44	410	300
6(53)	860	600	19	320	600	32	740	300	45	320	500
7	310	300	20	960	600	33	130	300	46	630	400
8	630	500	21	720	500	34	140	300	47	540	400
9	720	500	22	1 120	400	35	210	200	48	630	300
10	1 370	500	23	1 320	300	36	170	100	49	650	400
11	970	400	24	1 020	500	37	170	100	50	570	200
12	700	300	25	1 030	600	38	960	500	51	720	300
13	1 120	600	26	1 020	500	39	720	500	52	640	200

2.2　模拟与分析

结合文献[10]要求以及文献[5]的实验研究,定义全部节点最小服务水头为 280 kPa,最小供水水头为 60 kPa. 所有节点重要系数设置为该节点初始节点流量. 非影响区节点压力高于最低服务水头时, b_j 取 1;当非影响区节点压力低于最低服务水头而高于最小供水水头时,b_j 取 2;当非影响区节点压力低于最小供水水头时,b_j 取 5.

对算例管网按照上述参数进行管道失效后果评价模拟. 经模拟计算,整个管网所有管道失效后果值最大为 2.849,最小为 0.074. 将影响区节点流量减少情况表示为 $\sum_{i=1}^{m}(\gamma_i \mid \Delta q_i \mid)$,将非影响区节点流量减少情况表示为 $\sum_{j=1}^{n}(\zeta_j \mid \Delta q_j \mid)$,将非影响区节点压力降低情况表示为 $\sum_{j=1}^{n}{}_{j}(\zeta_j b_j \mid \Delta h_j \mid)$,计算结果见图 2. 将失效后果分为很轻微、较轻微、中等、严重、很严重 5 类,失效后果值对应的取值范围分别为(0,0.6],(0.6,1.2],(1.2,1.8],(1.8,2.4],(2.4,3.0]. 形成的评价结果见图 3.

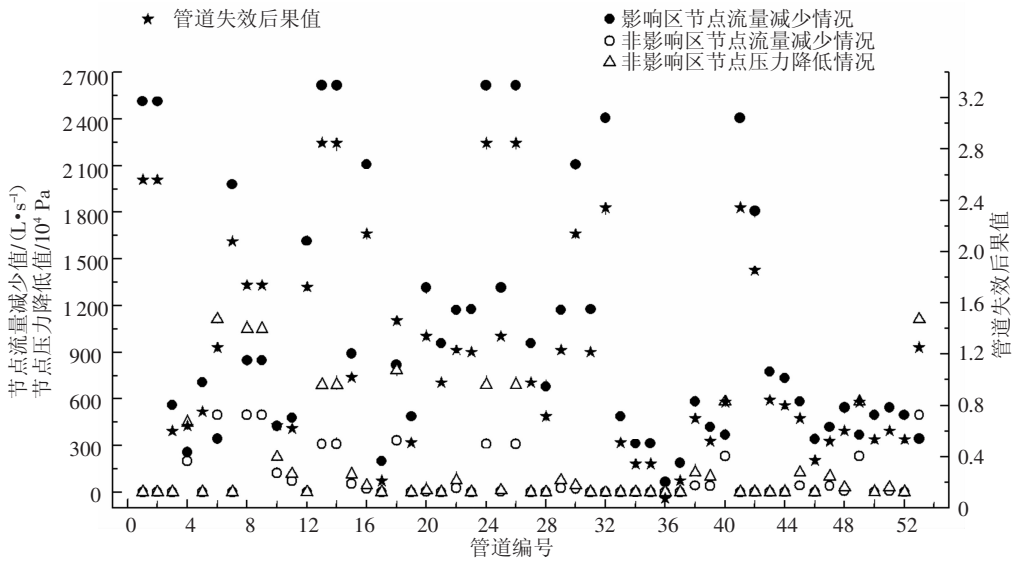

图 2　各评价指标与管道失效后果值分布图

对应每一条管道发生事故时,由图 2 可知造成的影响区节点流量减少情况,非影响区节点流量减少情况、压力降低情况. 借助评价结果可以适当分析管网状态,如 9 号管道事故造成的影响区

压力降低较严重,经分析可知该管道承担输水的重要角色;13 号管道事故造成的影响区流量减少非常大,这与该管道周围阀门布置数量过少有很大关系. 同时,部分管道的各评价指标值及管道失效后果值是相同的,这是因为任一个这些管道发生事故后采取的关阀方案是一样的,造成的失效管道也是一样的.

根据图3 各管道失效后果情况可知,被评定为严重和很严重的管道基本上是由于阀门设置过少或管网连通性不好形成的,比如树状管网较大规模的存在,干管事故造成的后果就比较严重.

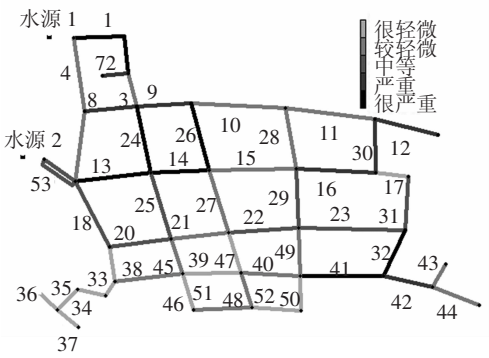

图3 管道失效后果评价成果图

2.3 降低管道失效后果的措施

根据建立的城市供水管道失效后果评价模型对所有管道进行事故评价,依据评价结果可以了解某个管道在管网中承担的角色及阀门布置的合理性,评价现有拓扑关系下管网的服务性能,克服单纯依据拓扑图定性分析的弊端,并可以依据评价结果合理制定降低管道失效后果的措施:

1)减小影响区节点流量减少值. 如优化阀门布置、增加阀门布设量、扩建管网,尽量对用水量大户采用环状网供水,避免较大树状网的存在.

2)降低管道事故对非影响区的影响. 如增加输水管之间的联络管、管网分区改建等.

3 结 语

建立的城市供水管道失效后果评价模型实现了预定功能的模拟和所有变量取值统一到节点上的目的,即评价对象取值微观化,很好地发挥了微观水力模型的作用,是对以往宏观性评价的突破;通过模型的模拟结果能有效指导管道改造,从而降低管道失效后果,提高管道运行维护的管理水平.

参考文献:

[1] HSIEH J W, CHUANG C H, CHEN S Y, *et al.* Segmentation of human body parts using deformable triangulation[J]. Systems Man and Cybernetics, 2010, 40(3):596 - 610.

[2] LIN Yucheng. Developing case-based communities of practice for teaching the legal aspects of construction: lessons learned in Taiwan[J]. J Legal Affairs Dispute Resolution Eng Constr, 2009, 1:200 - 209.

[3] ROSSMAN J. EPANET user's manual[R]. Cincinnati, U. S. A: United States Environmental Protection Agency, 2000.

[4] ANG W K, JOWITT W. Solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions[J]. Jour AWWA, 2006, 132(3):175 - 182.

[5] 周建华, 赵洪宾, 胡文茜. 城市供水管网事故时的水力分析[J]. 给水排水, 2004, 30(8):104 - 107.

[6] NING Ran, ZHAO Hongbin, WU Guoquan, *et al.* Study on assessment of accidents in urban water supply system[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(13):74 - 81.

[7] 严大凡. 油气长输管道风险评价与完整性管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[8] 迟国泰, 王卫. 基于科学发展的综合评价理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[9] LI Li, HAO Zhenchun, WANG Jiahu, *et al.* Impact of future climate change on runoff in the head region of the Yellow River[J]. J Hydrologic Engrg, 2008, 13:347 - 354.

[10]上海市建设和交通委员会. GB50013-2006, 室外给水设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006.

(编辑 刘 彤)