

文章编号:1004-4574(2013)01-0214-05

灾害环境下生命线系统的级联失效研究

周方明,张明媛,袁永博

(大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024)

摘要:以供水管网为例,使用在供水管网水力延时模拟软件 EPANET 2.0 基础上二次开发的程序对管网遭受的灾害环境进行动态模拟,选取节点不同时刻的水压作为考察供水管网节点资源供给量受影响程度的指标,提出了节点失效关联度的概念,应用灰色关联分析方法,计算并比较了网络中其它节点与受损节点间的节点失效关联度,分析了资源的分配与传输和网络拓扑结构两个方面对供水管网级联失效过程的影响特征,初步探讨了灾害环境下生命线系统的级联失效过程。

关键词:生命线系统;级联失效;动态模拟;灰色关联分析;节点失效关联度

中图分类号:X4

文献标志码:A

Cascading failure of lifeline systems under disaster environment

ZHOU Fangming, ZHANG Mingyuan, YUAN Yongbo

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To analyze the cascading failure process of lifeline systems under disaster environment, this paper took water supply network as an example and simulated its disaster environment by a program which was developed based on EPANET 2.0. Nodal water pressures at different times were chosen to analyze the disaster's effects on the nodal resource supply of water supply network, and a concept of relational grade of nodal failure was proposed. Based on gray relation analysis, the relational grade between the damaged nodes and other nodes was calculated and compared, and then the cascading failure process of water supply network was analyzed from two aspects: distribution and transmission of resources and network topology. Results showed that the cascading failure process of lifeline systems under disaster environment depends on the distribution and transmission of resources and network topology respectively, and the distribution and transmission of resources impacts the cascading failure of lifeline physical network more than its own network characteristics.

Key words: lifeline system; cascading failure; dynamic simulation; gray relation analysis (GRA); relational grade of nodal failure

交通、通信、电力、供热、给排水等城市基础设施是保障城市正常生活和生产的生命线系统,是城市的“血液循环系统”和“免疫系统”^[1-2]。近年来灾害频繁发生,使得对灾害环境下生命线系统的失效模式研究日渐重要。灾害作用下的生命线管网系统的破坏模式多为由于管网某处的一个微小扰动的触发造成整个管网的连锁反应,从而导致系统中的大部分产生崩溃的灾难性后果^[3]。研究生命线管网上的灾害动态传播问题对于生命线工程的灾害预测以及灾后的修复和应急管理工作具有重要作用。

收稿日期:2012-03-24; 修回日期:2012-06-18

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52108081)

作者简介:周方明(1986-),男,硕士研究生,主要从事城市及生命线减灾管理与风险评估技术研究。E-mail:zhoufangming@yahoo.cn

本文以供水管网为例,在对供水管网水力延时模拟软件 EPANET 2.0 进行二次开发的基础上,对管网遭受的灾害环境进行动态模拟,选取能够充分反映供水管网中节点资源供给量(实际供水量)受灾害影响程度的节点水压作为考察指标,引入节点失效关联度的概念,应用灰色关联分析方法,对灾害作用下供水管网的级联失效模式进行研究,并讨论了管网拓扑结构对级联失效的影响。

1 生命线系统级联失效研究现状

网络系统中普遍存在节点间的失效相关性,使得对其进行可靠性分析和建模都非常复杂。忽略这种相关性,简单地在各节点失效相互独立的假设条件下进行系统可靠性分析,常常会导致过大的误差,甚至得出错误的结论^[4-5]。

已有的一些生命线系统相关失效的研究大多是从共因失效这种静态失效模式开展的,即同时考虑系统中的两个或两个以上节点或链路失效的情况,而相对少的探讨动态的级联失效问题^[6]。级联失效也称为传播失效,它是指如果网络中一个或少量节点或边因发生故障而失效,会引发网络中流量或资源的重新分配,进而引起其他节点因流量或资源供给不满足条件而崩溃失效,由此使得故障逐步传播、产生级联效应,最终可能导致网络中相当一部分节点甚至整个网络的崩溃。其区别于共因失效的特征在于:共因失效是系统外部扰动造成系统单元同时故障;而级联失效是系统内部的某个单元故障,引起其他单元故障的情况。也就是说,级联失效的根本原因在于系统内部单元之间的相互影响和相互关联。

已有的有关级联失效网络问题的研究的载体多是虚拟网络,如疾病传播、物流保障等,涉及实体网络的研究很少见。所以,以往的关于网络系统级联失效的研究更多的只考察了网络拓扑结构的特征,注重从节点度、介数方面开展相关研究^[7-9],甚至更多的探讨了无标度网络、随机网络等不同网络结构的级联失效性,而忽略了生命线系统这类实体网络中资源分配的很多特征,但对于生命线实体网络而言,资源的分配与传输、方向与过程对其系统的失效问题的影响甚至超过了其自身的网络特性。

2 节点失效关联度

2.1 灰色关联分析

灰色关联分析^[10-11](GRA)是一种以灰色关联度顺序为依据,来描述因素间关系的强弱或大小的方法。

GRA的“实质”是整体比较,是有参考系、有测度的比较。其基本思想是将因素的数据序列作为依据,使用数学的方法对因素间的几何对应关系进行研究。目前,GRA已被广泛应用于经济、管理、农业、医学等领域,并均取得了显著效果。

考虑到GRA实际上是对动态指标进行量化分析,正符合研究灾害在生命线管网上动态传播过程中管网发生级联失效的需要。因此,本文引入节点失效关联度的概念,运用灰色关联分析方法,对生命线管网系统的级联失效过程进行动态量化分析。

2.2 节点失效关联度计算方法

节点失效关联度的计算步骤如下:

(1) 选定节点考察指标(可选定一个或多个指标,本文仅考虑单指标情形);

(2) 通过灾害环境模拟,生成网络中各节点(包含失效节点和网络中其余节点)在各设定时刻的指标状态,并形成指标状态序列;

(3) 假设网络中有 n 个节点。将失效节点的状态指标序列作为参考序列 x_0 ,网络中其余节点的指标状态作为比较序列 $x_i(i=1,2,\dots,n-1)$;

(4) 初值化: $x_i' = \frac{x_i}{x_i(1)} = \left(\frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(k)}{x_i(1)} \right), i=0,1,2,\dots,n-1$;

(5) 求指标状态差序列,最大差和最小差, x_0' 与 x_i' 对应 k 时刻($k=1,2,\dots,t$)之差的绝对值构成指标状态差序列;

差序列: $\Delta_{0i}(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)|$;

最大差: $\Delta_{0i}(\max) = \max_k \Delta_{0i}(k)$;

最小差： $\Delta_{0i}(\min) = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k)$ ；

(6) 求节点失效关联系数 $r(x_0(k), x_i(k))$ 。

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}$$

式中 ξ 为分辨系数,其取值在 0 与 1 之间,本文取 $\xi = 0.5$;

(7) 计算节点失效关联度 $r(x_0, x_i)$ 。 $r(x_0, x_i) = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t r(x_0(k), x_i(k))$ 本文采用等权方式计算节点失效关联度,还可视具体情况采取非等权方式进行计算,指标权重确定方法可参考文献[12]。

3 灾害模拟及实例分析

将在 EPANET 2.0 基础上进行二次开发后的供水管网灾害模拟程序应用于某一供水管网(见图 1)。管网中的节点属性和管段属性见表 1、表 2;水泵输送扬程为 60 m,流量为 500 L/s。为计算方便,本文不考虑场地因素对供水管网级联失效的影响。由于管网节点水压不仅是直接反映城市供水服务质量指标,更是全面掌握供水管网运行状态以及对整个供水系统实施正确调度的重要参数,因此,本文选取节点水压作为考察节点受影响程度的指标。在供水管网中 4 节点处施加一灾害作用,导致 4 节点受损,程序模拟出 4 节点受损后管网中各节点的水压降低过程,本文选取其中 4 个时刻($t = 1, 2, 3, 4$, 其中 $t = 1$ 为初始时刻)的数据(数据见表 3)构成节点水压的状态序列,以用于节点失效关联度的计算。

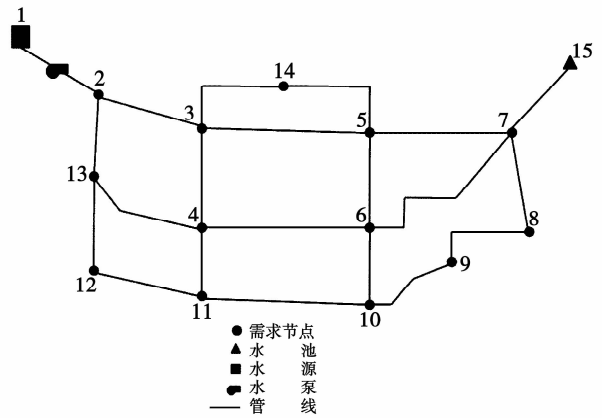


图 1 管网布置平面图

Fig. 1 Plane figure of pipe network

根据模拟结果表 3 中列出的数据,应用前文所述的节点失效关联度计算方法进行计算,得到受损节点 4 与网络中其余各受影响节点之间的节点失效关联度(表 4)。

显然,失效关联度越大,网络中其余节点与失效节点间的联系越紧密,越容易受失效节点影响,反之,关联度越小,说明其越难被失效节点所影响。为分析、比较方便,进一步将各受影响节点与受损节点 4 的节点失效关联度按从大到小的顺序进行排序并划分为强关联、较强关联、中等关联、较弱关联和弱关联 5 个等级,见表 5。

表 1 节点信息

Table 1 Data of nodes

节点编号	标高/m	需水量/(L · s ⁻¹)	节点编号	标高/m	需水量/(L · s ⁻¹)
1	4.14	0	8	6.16	30.6
2	4.14	0	9	5.70	56.4
3	5.73	14.6	10	5.27	43.4
4	5.58	35.1	11	7.28	50.8
5	5.82	51.2	12	5.43	38.8
6	5.27	82.3	13	7.07	40.1
7	6.71	40.8	14	7.65	39.9
15	9.75	0			

表 2 管段信息

Table 2 Data of pipes

管段编号	始节点	终节点	长度/m	直径/mm	C 因子	管段编号	始节点	终节点	长度/m	直径/mm	C 因子
1	2	3	320	400	100	11	13	4	480	300	100
2	3	5	650	300	100	12	4	11	260	300	100
3	3	4	330	300	100	13	12	11	330	300	100
4	4	6	590	300	100	14	11	10	610	300	100
5	6	5	350	200	100	15	10	6	300	300	100
6	5	7	550	200	100	16	10	9	310	300	100
7	7	15	270	300	100	17	9	8	330	300	100
8	7	6	660	200	100	18	8	7	380	300	100
9	2	13	220	400	100	19	3	14	250	200	100
10	13	12	360	300	100	20	14	5	240	200	100

表 3 各时刻节点水压

Table 3 Nodal water pressure at different times

节点编号	时刻				节点编号	时刻			
	1	2	3	4		1	2	3	4
2	50.22	44.97	40.45	35.77	9	18.23	14.87	12.88	8.49
3	38.09	31.94	26.77	21.40	10	24.44	19.20	15.25	10.05
4*	33.95	25.42	17.89	10.26	11	36.64	29.07	22.22	14.89
5	28.27	22.92	18.69	13.90	12	35.68	28.72	22.51	15.95
6	25.26	19.71	15.45	10.18	13	36.45	30.36	25.07	19.58
7	12.64	10.95	10.15	7.64	14	23.56	17.98	13.49	8.55
8	15.06	12.78	11.39	7.53					

注:1)表中数据单位为 1 m 高水压; 2)标“*”的节点为受损节点。

表 4 节点失效关联度

Table 4 Relational grade of nodal failure

$r(x_4, x_2)$	$r(x_4, x_3)$	$r(x_4, x_5)$	$r(x_4, x_6)$	$r(x_4, x_7)$	$r(x_4, x_8)$	$r(x_4, x_9)$	$r(x_4, x_{10})$	$r(x_4, x_{11})$	$r(x_4, x_{12})$	$r(x_4, x_{13})$	$r(x_4, x_{14})$
0.585 1	0.668 8	0.723 0	0.811 2	0.616 5	0.663 3	0.710 8	0.794 8	0.801 2	0.758 7	0.683 9	0.880 9

由计算结果不难看出,当灾害作用于节点 4 时,不仅节点 4 本身受损,水压降低,影响其正常供水,还会由于网络中节点的失效相关性产生级联失效,进而对网络中其他节点造成不同程度的影响,使得其他节点不能正常供水或停止供水,严重时可导致整个供水管网瘫痪。我国规范规定,供水管网的节点水压应不低于 10 m,水压低于 10 m 的节点可以视为丧失供水能力的失效节点^[13]。以此为据,本例中由于节点 4 受损,除其自身丧失供水能力外,还将导致节点 7,8,9,14 完全丧失供水能力,导致节点 5,6,10,11 严重丧失供水能力,导致节点 3,12,13 无法正常供水,造成了整个供水管网瘫痪的灾难性后果。

从网络中其余各节点失效情况来看,节点由于级联作用而导致失效的程度大体趋势上符合表 5 中的结果,但仍有细微差别,因此,本文还从网络拓扑结构的角度进行了分析。将生命线系统网络中节点间的拓扑结构联系定义为以下 3 对关系:直接关系和间接关系、控制关系和从属关系、下游节点并列关系和上游节点并列关系。

通过多次对网络中不同节点遭受灾害作用的情景进行模拟,可以得出 3 对拓扑结构关系对节点间级联失效影响的强弱关系为:(1)直接关系强于间接关系。如节点 6,11 等受影响程度明显强于 8,9 等节点(2)从属关系强于控制关系。如节点 6,11 等受影响程度也明显强于 3,13 等节点。(3)并列关系影响效果不显著。

由以上分析可知,灾害环境下生命线系统发生级联失效的过程是由网络中资源的分配与传输和网络自

表 5 节点关联等级

Table 5 Nodal relational level

关联等级	划分范围	节点编号
强关联	0.900 0 ~ 1.000 0	无
较强关联	0.800 0 ~ 0.900 0	14,6,11
中等关联	0.700 0 ~ 0.800 0	10,12,5,9
较弱关联	0.600 0 ~ 0.700 0	13,3,8,7
弱关联	0.500 0 ~ 0.600 0	2

身的拓扑结构共同决定的,而且对于生命线实体网络而言,资源的分配与传输、方向与过程对网络系统级联失效过程的影响甚至超过了其自身的网络特性。以3,4节点为例,尽管两节点在拓扑关系上有着最为紧密的联系,但从资源分配角度分析,两个节点的失效关联度却是较低的。

4 结论与展望

本文提出了一种研究灾害环境下生命线系统级联失效过程的有效方法,以供水管网为例,使用开发的程序对管网遭受的灾害环境进行动态模拟,选取节点不同时刻的水压作为考察供水管网节点资源供给量受影响程度的指标,并提出了节点失效关联度的概念,应用灰色关联分析方法,计算并比较了网络中其它节点与受损节点的节点失效关联度,从资源的分配与传输和网络拓扑结构两个方面分析了供水管网发生级联失效的过程,实例分析结果表明,该方法简单、实用。并在分析结果基础上,得出灾害环境下生命线系统发生级联失效的过程是由网络中资源的分配与传输和网络自身的拓扑结构共同决定的,而且对于生命线实体网络而言,资源的分配与传输、方向与过程对网络系统级联失效过程的影响甚至超过了其自身的网络特性的结论。

本文仅给出了在局部、小范围的生命线管网中由于某一处遭受灾害而产生级联失效的计算过程,如分析多个节点或管段同时遭受灾害的情形或在一个庞大、复杂的供水管网体系中,此计算方法仍然有效。对于多处同时遭受灾害的情形,计算时需考虑级联失效的叠加效应;对于复杂供水体系级联失效分析,本文计算过程仅为整个管网级联失效计算的第一级,可将多个局部供水管网视为复杂供水网络体系的子系统,应用本文前述模拟及计算方法,逐级分析整个供水体系的级联失效。本文尚未对节点失效状态的模糊性展开研究,考虑不同模糊态下的失效关联度是今后研究的主要问题之一。

参考文献:

- [1] 操铮,刘茂,许同生. 城市生命线系统的地震网络可靠性研究[J]. 自然灾害学报,2011,20(6):32-39.
CAO Zheng,LIU Mao,XU tongsheng. Research on seismic network reliability of urban lifelines system[J]. Journal of Natural Disasters,2011,20(6):32-39. (in Chinese)
- [2] 尤建新,陈桂香,陈强. 城市生命线系统的非工程防灾减灾[J]. 自然灾害学报,2006,15(5):194-198.
YOU Jianxin,CHEN Guixiang,CHEN Qiang. Non-structural disaster prevention and reduction measures of urban lifeline systems[J]. Journal of Natural Disasters,2006,15(5):194-198. (in Chinese)
- [3] Buzna L,Peters K,Helbing D. Modeling the dynamics of disaster spreading in networks [J]. Physica A,2006,363:132-140.
- [4] 谢丰,程苏琦,陈冬青,等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性[J]. 清华大学学报:自然科学版,2011,51(10):1252-1257.
XIE Feng,CHENG Suqi,CHEN Dongqing, et al. Cascade-based attack vulnerability in complex networks[J]. J Tsinghua Univ:Sci & Tech, 2011,51(10):1252-1257. (in Chinese)
- [5] 李翠玲,谢里阳. 相关失效分析方法评述与探讨[J]. 机械设计与制造,2003(3):1-3.
LI Cuiling,XIE liyang. Review and discussion of dependent failure analysis methods[J]. Machinery Design & Manufacture,2003(3):1-3. (in Chinese)
- [6] Javanbarg M B,Scawthorn C,Kiyono J, et al. Multi-hazard reliability analysis of lifeline networks[C]//Proceedings of the 2009 ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference,2009:1-8.
- [7] Chang S. Anticipating cascading consequences of infrastructure failures in disasters cascading consequences of infrastructure failures[C]//4th Australasian Natural Hazards Management Conference. Wellington,New Zealand,2010.
- [8] Zheng J,Gao Z,Zhao X. Modeling cascading failures in congested complex networks [J]. Physica A:Statistical Mechanics and its Applications, 2007,385(2):700-706.
- [9] Wu Z H,Fang H J. Cascading failures of complex networks based on two-step degree[J]. Chinese Physics Letters,2008,25(10):3822-3825.
- [10] 李彰俊,郭瑞清,吴学宏. “雪尘暴”灾情形成的多因素灰色关联分析[J]. 自然灾害学报,2005,14(5):31-37.
LI Zhangjun,GUO Ruiqing,WU Xuehong. Grey incidence analysis of factors affecting “snow-dust storm” disaster[J]. Journal of Natural Disasters,2005,14(5):31-37. (in Chinese)
- [11] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002:135-141.
DENG Julong. The Basis of Grey Theory[M]. Wuhan:Press of Huazhong University of Science & Technology,2002:135-141. (in Chinese)
- [12] 张风华,谢礼立. 城市防震减灾能力指标权数确定研究[J]. 自然灾害学报,2002,11(4):24-29.
ZHANG Fenghua,XIE Lili. Study on determination of index weights for city's ability in earthquake disasters reduction[J]. Journal of Natural Disasters,2002,11(4):24-29. (in Chinese)
- [13] 陈玲俐,李杰,叶志明. 震后特殊供水状态下的供水管网水力分析[J]. 自然灾害学报,2004,13(3):89-94.
CHEN Lingli,LI Jie,YE Zhiming. Hydraulic analysis of post-earthquake water supply network[J]. Journal of Natural Disasters,2004,13(3):89-94. (in Chinese)