第 37 卷 第 4 期
2015 年 12 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 37 No.4
Dec., 2015

基于改进的风险矩阵法的生命线网络地震脆弱性分析①

申 思，张明媛，袁永博

（大连理工大学建设工程学部建设管理系，辽宁 大连 116024）

摘要：生命线网络的脆弱性不单单只表示地震发生后对网络作用而产生的后果，还应该包括网络的连通情况。本文在重新确定生命线网络脆弱性定义的基础上，运用风险评估理论中的风险矩阵方法综合考虑生命线网络的连通性能和失效后果两个方面来评价生命线网络的脆弱性，并以一个供气管网为例说明改进的风险矩阵法评价生命线网络脆弱性的有效性和合理性，找出供气管网中脆弱性等级最高的节点，分析其脆弱性等级最高的原因，以便于重点保护，并降低网络的脆弱性。

关键词：生命线网络；脆弱性；连通性；失效后果；改进的风险矩阵

中图分类号：TU99；X4 **文献标志码：**A **文章编号：**1000－0844(2015)04－0963－06

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2015.04.0963

Seismic Vulnerability Analysis of Lifeline Networks Using Improved Risk Matrix Method

SHEN Si, ZHANG Ming-yuan, YUAN Yong-bo

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

Abstract: Modern societies are becoming increasingly dependent on critical infrastructure systems to provide essential services that support economic prosperity, governance, and quality of life. A nation's health, wealth, and security rely on the production and distribution of certain goods and services. Critical infrastructures are the physical assets, processes, and organizations across which these goods and services move. Earthquakes have highlighted the importance of stable electric, gas and oil, water, transportation, banking and finance, and control and communication infrastructure systems. The frequency of earthquakes has been increasing in recent years; hence, the vulnerability of lifeline networks in the event of an earthquake must be studied. In this study, we analyzed the seismic vulnerability of lifeline networks. First, we present the status of domestic and international research on the seismic vulnerability of lifeline networks. Although numerous studies have been conducted on the seismic vulnerability of lifeline networks, most of them considered the seismic vulnerability of lifeline networks in the event of an earthquake to be a series of consequences. In this study, we consider that the lifeline network vulnerability in terms of the consequences of the network after the earthquake as well as network connectivity. Second, we redefined the concept of seismic vulnerability of lifeline networks as the ability of connectivity and enduring failure consequences in the event of an earthquake. Third, on the basis of the new definition of lifeline network vulnerability, we evaluate the lifeline network vulnerability using

① **收稿日期：**2014-07-16

基金项目：国家自然科学基金(51208081)；辽宁省教育厅高等学校科学研究一般项目(L2014034)

作者简介：申 思(1990－)，女，博士研究生，主要研究方向为生命线网络抗震研究。E-mail：shensi@mail.dlut.edu.cn。

the risk matrix theory method. This study considers two aspects: lifeline network connectivity and failure consequences. Because network connectivity probability and failure probability have a complementary relationship, connectivity probability represents the possibility of occurrence of a risk in the risk matrix. The failure consequences of a lifeline network can be characterized by the network topology and function change; therefore, we used these two indicators to represent network failure consequences. Hence, this improved method is employed in this study to comprehensively assess lifeline network vulnerability. The improved risk matrix method can completely represent the lifeline earthquake vulnerability as defined in this study. By considering lifeline network connectivity and failure consequences in the event of an earthquake, we can determine the corresponding level. Therefore, we can determine the lifeline network level of seismic vulnerability in a most direct and convenient way. Finally, we use a gas pipeline to illustrate the effectiveness and rationality of this improved risk matrix method. The highest vulnerability level nodes in this gas supply pipe network are nodes 3, 7, and 9 primarily because nodes 7 and 9 are located at the end of the network; therefore, the connectivity with the source point is very low. The highest vulnerability grade of node 3 can be attributed to its poor connectivity and high water level. Therefore, in the future, we must focus on these nodes for seismic protection.

Key words: lifeline network; vulnerability; connectivity; failure consequence; improved risk matrix

0 引言

城市生命线系统指保障人民生活和城市活动正常运转的各类基础设施，主要包括给水、排水、供电、供热、供气、交通、通信等网络系统[1-2]。随着近年来地震灾害频频发生，对生命线网络在地震情况下的脆弱性研究显得日益重要。

国内外学者纷纷对生命线网络的地震脆弱性方面展开研究并取得了丰硕的成果。Aggarwal 等[3]最早提出了不交最小路方法和最小路不交化定理；Dotson 等[4]提出了最小路时间概率递推算法；李杰等[5]提出了系统结构函数的递推分解格式，建立了生命线网络在地震作用下的递推分解算法，并应用于上海市的主干供水系统网络图，证明了该方法的有效性。柳春光等[6]提出一种把 Warshall 算法与蒙特卡洛模拟法相结合的方法，克服了图论法和模糊数学法在计算机中运行速度慢的缺点，可以更加快速地计算出供电系统的地震破坏概率。同时有很多学者通过建立评价指标体系，用模糊评价、层次分析法等评价方法评估出地震作用下生命线网络脆弱性。尹洪英[7]首先构建了影响道路交通运输网络地震脆弱性因素的解释结构模型，又建立了一个在地震情况下的道路交通运输网络脆弱度的综合评估模型。何双华等[8]以供水网管的拓扑结构和节点服务特性作为影响管网脆弱性的因素，采用分层的分析方法判断网络在地震作用下的易损性程度。邹亮等[9]根据供水设施施工图、管线普查资料以及地质勘探资料评价了淮南市供水系统的抗震性能，并提出了相应的抗震防灾对策。周启航等[10]考虑了电力系统在地震作用下故障发生的概率和故障对系统造成的影响。

综上所述，虽然有很多学者研究了生命线网络的地震脆弱性，但是大多把地震脆弱性看成网络在地震发生后被迫中断而产生的一系列后果。本文认为生命线网络的脆弱性不单单只表示地震对网络作用而产生的后果，还应该考虑网络的连通情况。因此借鉴风险评估理论中的风险矩阵方法综合考虑生命线网络的连通性和失效后果两个方面来评价生命线网络的脆弱性。

1 生命线网络脆弱性的概念

近年来，国内外有关生命线网络脆弱性的研究越来越多，但是关于生命线网络脆弱性的定义目前还存在很大的分歧，没有形成一个确定的、一致的概念。基于目前的研究成果，可以把生命线网络脆弱性概念的研究分为两类。其中一些学者认为生命线网络脆弱性是指承灾体受到自然灾害或人为破坏等外力作用下损坏的程度，又称为易损性[11-12]，与网络中的某部分失效所产生的后果相关，与网络的连通性能无关。典型的代表为 Timmerman[13]，他把脆弱性看成系统在灾害条件下产生不利影响的程度；

D'Este 等[14]同样认为可靠性主要描述了生命线系统在地震状态下的网络性能能够维持在一定的服务水平之上且满足使用要求的概率，即着眼于网络内部的连通性和连通概率，而脆弱性则注重于网络失效后所触发的严重后果，从中找出易使网络失效的薄弱环节。另一类学者认为生命线网络脆弱性不仅要考虑网络失效产生的后果，还要考虑网络的连通情况。Husdal[15]把脆弱性与风险联系在一起，指出脆弱性应该属于风险的一部分，与失效发生的后果和网络连通性能密切相关。Jenelius[16]和 Erath[17]认为可以用风险的度量方法计算生命线网络的脆弱性，将脆弱性定义为网络失效的概率与网络失效造成的后果的乘积。

基于以上观点，本文认为在研究生命线网络地震脆弱性时应该综合考虑网络的连通情况和失效产生的后果。因为网络的连通概率越低会导致网络功能下降的可能性越大，即对网络的破坏性越强，生命线网络在地震作用下的任何破坏都可以视作脆弱性的表现，故要把网络的连通情况包含到生命线网络地震脆弱性中；而失效后果直接反映了生命线网络在遭受地震破坏下的损失程度，因此在研究生命线网络地震脆弱性时应该考虑失效后果。综合以上分析，本文重新定义了生命线网络地震脆弱性的概念，即生命线网络地震脆弱性指生命线网络在地震作用下能够承受不利影响的连通情况和失效后果的能力。

2　改进的风险矩阵

风险矩阵起源于工程项目风险管理领域，是美国空军电子系统中心（ESC，Electronic Systems Center）于 1995 年 4 月提出的，是在项目管理过程中识别风险（风险集）重要性的一种结构性方法[18]。风险矩阵法通过定性和定量分析综合考虑风险影响和风险概率两方面的因素，与其他方法不同的是，该方法不直接由专家意见得出判断矩阵，而是事先对风险影响和风险概率确定等级划分，判断出风险影响和风险概率所处的量化等级，进而评估风险因素对项目的影响。

传统的风险矩阵主要有两个要素：风险发生的后果及其可能性，由于网络的地震连通概率是地震失效概率的补集，故用连通概率即连通性代表风险矩阵中地震作用下风险发生的可能性；而网络失效的后果可以表现为地震破坏下网络拓扑结构和网络功能两个方面的变化，故用这两个指标代表地震后网络失效所引发的后果。因此可以把风险矩阵进行改进，综合评估生命线网络地震脆弱性。改进的风险矩阵方法的优点是可对应本文中生命线网络的地震脆弱性定义，综合考虑地震作用下生命线系统网络的失效概率和产生的后果，并判断出相应的等级，从而以最直接的方式得出生命线网络的地震脆弱性等级。

具体步骤如下：

第一步：连通性计算：采用蒙特卡洛模拟法计算网络的连通性，该方法原理简单、易于理解，通过编程还能避免计算中的数学困难，不受系统维数和复杂性的限制，计算精度也达到了连通性计算的要求，非常适用于解决生命线网络这种大型复杂系统的计算。

（1）计算在地震作用下生命线网络中各节点的破坏概率；

（2）用蒙特卡洛法对网络中每个节点产生 0 到 1 之间的随机数，并与各个节点的破坏概率相比较。当随机数大于破坏概率时，认为该节点可以正常工作，并赋值 1；否则认为该节点单元失效，赋值为 0；

（3）重新修改生命线网络的邻接矩阵并重复步骤(2)，进行多次模拟，当模拟次数 N 足够大时，节点连通的频率即为两节点连通概率的近似值。

（4）将得到的各节点的连通概率与表 1 连通性等级划分表比较，得到生命线网络各节点的连通性等级。

表 1　节点连通性等级划分表

Table 1　Connectivity level of nodes

状态	不连通	严重不连通	中等不连通	轻微不连通	连通
连通概率	(0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1.0]
连通性等级	1	2	3	4	5

第二步：失效后果计算：基于主动攻击的网络脆弱性评估模型[19-20]，其主要思想为：采用分层的分析体系，充分考虑生命线网络的拓扑结构和所承担的服务性能对网络脆弱性的影响，建立评价指标体系，求出各节点的指标值，再根据标度表给每个指标值赋予标度，由层次分析法得出每个指标的权重，进而

得出节点的失效后果指标值。

(1) 构建评价指标体系。本指标体系主要包含两大指标,即节点的拓扑位置和服务性能。拓扑位置可以用节点度数和节点级数来确定;服务性能可以用节点在地震作用下的节点压力变化百分比、流量变化百分比或者电压变化百分比等因素确定;

(2) 确定节点度数 m,级数 n 和服务性能变化百分比 f,并得出各指标标度值。因为各指标的量纲不同不能放在一起比较,故需要放在一个标度表中量化,可根据表 2 得出各指标的标度值 m_0,n_0,f_0;

表 2 节点失效后果指标标度表

Table 2 Scale table for failure consequence index of nodes

标度	度数	级数	服务性能变化百分比
5	1	≥5	≤60%
4	2	4	(60%,70%]
3	3	3	(70%,80%]
2	4	2	(80%,90%]
1	≥5	1	(90%,100%]

(3) 确定指标权重。用层次分析法[21]算出各指标权重 ω_1,ω_2,ω_3;

(4) 计算网络脆弱性并评定失效后果等级,其计算公式为 $\gamma = m_0\omega_1 + n_0\omega_2 + f_0\omega_3$。根据表 3 得出生命线网络的失效后果等级。

第三步:对照改进的风险矩阵表,得出各节点的脆弱性等级。风险改进表如表 4 所示。

表 3 节点失效后果等级划分表

Table 3 Failure consequence level of nodes

失效后果程度	严重	较严重	一般严重	较不严重	不严重
γ	≥3.5	[3,3.5)	[2.5,3)	[2,2.5)	≤2
失效后果等级	5	4	3	2	1

表 4 改进的风险矩阵表

Table 4 Improved risk matrix

连通性等级	脆弱性等级				
5	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
4	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
3	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
2	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ
1	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ
失效后等级	1	2	3	4	5

注: 表中的罗马数字代表脆弱性等级,Ⅴ表示脆弱性高,Ⅳ表示脆弱性较高,Ⅲ表示脆弱性一般,Ⅱ表示脆弱性较低,Ⅰ表示脆弱性低。

3 算例分析

本文采用一个供气网络[22](图 1) 作为算例,对该管网进行脆弱性评估。

第一步:计算其连通性。从图 1 可以看出,节点 12、13、14 是源节点,本文要算的连通性概率为各节点与源点的连通概率,即假设源点在地震中不发生破坏。按照第 2 节中介绍的计算连通性的步骤,利用 MATLAB 软件模拟各节点的连通概率,模拟次数为 5 000 次,并根据表 1 判断其连通性等级,结果如表 5 所示。

表 5 供气网络连通概率及连通性等级

Table 5 Connectivity probability and connectivity level of gas supply network

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
连通概率	0.644 4	0.397 8	0.133 4	0.693 6	0.722 8	0.730 0	0.159 0	0.198 4	0.151 4	0.256 7	0.355 6	1	1	1
连通性等级	4	2	1	4	4	4	1	1	1	2	2	5	5	5

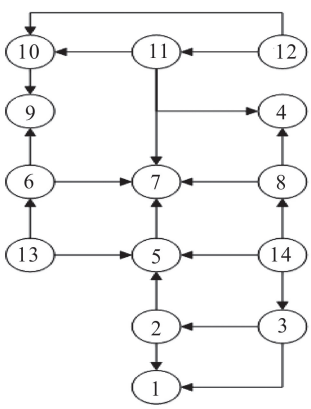

图 1 供气网络图

Fig.1 Gas supply network

第二步:计算其失效后果,同样是应用第 2 节介绍的算法,由于节点压力和流量之间存在换算关系[23],故只把压力变化百分比(震后压力与初始压力的比值)看作服务性能的衡量指标。其中用层次分析法算出的权重分别为:$\omega_1 = 0.35$,$\omega_2 = 0.35$,$\omega_3 = 0.3$。层次分析法的步骤详见参考文献[21],按照表 2 和表 3 的标度表和等级划分表,可得到表 6 的结果。

第三步:综合表 5 中各节点的连通性等级和表 6 中各节点的失效后果等级,并对照表 4 改进的风险矩阵,可得出各节点的脆弱性等级,结果见表 7。

由表 7 可以看出节点 3、7、9 的脆弱性等级最高。通过分析比较,其主要原因为:节点 7 和节点 9

主要位于网络的末端而导致其与源点的连通性最低；节点 3 的连通性较差，加上它的供水级数高，最终导致脆弱性等级最高，故在以后的抗震保护过程中应该重点关注。

表 6　供气网络失效后果指标值及失效后果等级

Table 6　Failure consequences index and level of gas supply network

节点编号	节点度数 m	度数标度 m_0	节点级数 n	级数标度 n_0	压力变化百分比 f/%	压力变化标度 f_0	脆弱程度 γ	脆弱性等级
1	2	4	3	3	59.5	5	3.95	5
2	3	3	3	3	61.8	4	3.3	4
3	3	3	2	2	54.6	5	3.25	4
4	2	4	3	3	92.4	1	2.75	3
5	4	2	2	2	31.5	5	2.9	3
6	2	4	2	2	84.1	2	2.7	3
7	3	3	3	3	66.7	4	3.3	4
8	3	3	2	2	85.1	2	2.35	2
9	2	4	4	4	95.0	1	3.1	4
10	3	3	2	2	94.4	1	2.05	2
11	4	2	2	2	99.5	1	1.7	1
12	2	4	1	1	100	1	2.05	2
13	2	4	1	1	100	1	2.05	2
14	3	3	1	1	100	1	1.7	1

表 7　供气网络脆弱性等级表

Table 7　Vulnerability level of gas supply network

脆弱性等级	节点编号
Ⅰ	12，13，14
Ⅱ	5，6，11
Ⅲ	4，10
Ⅳ	1，2，8
Ⅴ	3，7，9

4　结论

本文重新确定了生命线网络脆弱性的定义，认为生命线网络的脆弱性不单单只表示地震发生后对网络作用而产生的后果，还包括网络的连通情况。同时把风险评估理论中的风险矩阵方法引入并加以改进，应用到生命线网络的地震脆弱性评估中，用连通性即连通概率代表风险矩阵中风险发生的可能性，而网络失效的后果可以表现为网络拓扑结构和网络功能两个方面的变化，故用这两个指标代表网络失效后引发的后果，进而综合评估生命线网络的脆弱性。改进的风险矩阵方法能够对应本文的生命线网络的地震脆弱性定义，并结合定性和定量方法，综合考虑地震作用下生命线系统网络的失效概率和产生的后果，判断出相应的等级，从而以最直接的方式得出生命线网络的地震脆弱性等级。最后把改进的风险矩阵法应用于一个供气网络中，结果表明改进的方法具有较强的实用价值，能够标识出网络中各节点的脆弱性等级。

参考文献(References)

[1]　李杰.生命线工程的研究进展与发展趋势[J].土木工程学报，2006，39(1)：1-7.
LI Jie. The Progress in Lifeline Engineering Researches[J]. China Civil Engineering Journal，2006，39(1)：1-7.(in Chinese)

[2]　苏幼坡，刘天适，刘瑞兴.生命线地震工程的研究进展[J].世界地震工程，2003，19(2)：151-155.
SU You-po，LIU Tian-shi，LIU Rui-xing. The Advances of Studies on Lifeline Earthquake Engineering[J]. World Earthquake Engineering，2003，19(2)：151-155. (in Chinese)

[3]　Aggarwal K K，Misra K B. A Fast Algorithm for Reliability Evaluation[J]. IEEE Transactions on Reliability，1975，24(1)：83-85.

[4]　Dotson W P，Gobien J O. A New Analysis Technique Graphs [J]. IEEE Transactions on Reliability，Circuits & System，1979，5(28)：855-865.

[5]　李杰，何军.大型生命线工程抗震可靠度分析的递推分解算法[J].同济大学学报，2001，29(7)：757-762.
LI Jie，HE Jun. Recursive Algorithm for Seismic Reliability Evaluation of Large Scale Lifeline System[J]. Journal of Tongji University，2001，29(7)：757-762. (in Chinese)

[6]　柳春光，王茜.基于 Warshall 算法的供电系统抗震可靠性分析[J].世界地震工程，2013，29(2)：10-16.
LIU Chun-guang，WANG Qian. Seismic Reliability Analysis of Power-supply System Based on Warshall Algorithm[J]. World Earthquake Engineering，2013，29(2)：10-16.(in Chinese)

[7]　尹洪英.道路交通运输网络脆弱性评估模型研究[D].上海：上海交通大学，2011.
YIN Hong-ying. Research on the Evaluation Model of Road Transportation Network Vulnerability[D]. Shanghai：Shanghai Jiaotong University，2011.(in Chinese)

[8] 何双华,柳春光,赵顺波.供水管网系统地震易损性风险评估[J].然灾害学报,2012,21(2):95-101.
HE Shuang-hua, LIU Chun-guang, ZHAO Shun-bo. Earthquake Vulnerability Risk Assessment of Water Supply Network[J].Journal of Natural Disasters,2012,21(2):95-101.(in Chinese)

[9] 邹亮,樊超,陈志芬,等.淮南市供水系统抗震防灾对策[J].世界地震工程,2013,29(1):145-151.
ZOU Liang, FAN Chao, CHEN Zhi-fen. Countermeasures Against Earthquake Disaster of Water Supply System in Huainan City [J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29 (1):145-151. (in Chinese)

[10] 周启航,张东霞,郭强,等.电压崩溃的风险评估方法及应用[J].电网技术,2011,35(4):35-39.
ZHOU Qi-hang,ZHANG Dong-xia,GUO Qiang.A Method to Assess Risk of Voltage Collapse and Its Application[J]. Power System Technology,2011,35(4):35-39.(in Chinese)

[11] 尹占娥,暴丽杰,殷杰.基于 GIS 的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性研究[J].自然灾害学报,2011,20(2):29-35.
YIN Zhan-e,BAO Li-jie,YIN Jie.GIS-based Study on Vulnerability to Rainstorm Inundation in Pudong of Shanghai[J]. Journal of Natural Disasters,2011,20(2):29-35. (in Chinese)

[12] 冯领香,冯振环.基于故障树法的防震减灾系统脆弱性评估[J].世界地震工程,2013,29(1):34-37.
FENG Ling-xiang, FENG Zhen-huan. Evaluation of Earthquake Disaster Prevention and Reduction System Vulnerability Based on Fault Tree Method[J].World Earthquake Engineering,2013,29(1):34-37. (in Chinese)

[13] Timmerman P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications[M]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981:1-10.

[14] D'Este G M, Taylor M A P. Network Vulnerability: an Approach to Reliability Analysis at the Level of National Strategic Transport Networks[C]//Bell M G H, Iida Y, Eds. The Network Reliability of Transport. Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR). Oxford: Pergamon, England, 2003:23-44.

[15] Husdal J. Reliability and Vulnerability Versus Cost and Benefits[C]//The 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability. New Zealand: Queenstown and Christchurch, 2004:180-186.

[16] Jenelius E, Petersen T, Mattsson L G. Road Network Vulnerability: Identifying Important Links and Exposed Regions[J]. Transportation Research A, 2006, 40:537-560.

[17] Erath A, Birdsall J, Axhausen K W, et al. Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network[C]//88th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC, USA, 2009:1-17.

[18] 朱启超,匡兴华,沈永平.风险矩阵方法与应用述评[J].中国工程科学,2003(1):89-94.
ZHU Qi-chao, KUANG Xing-hua, SHEN Yong-ping. Risk Matrix Method and Its Application in the Field of Technical Project Risk Management[J].Engineering Science,2003 (1): 89-94.(in Chinese)

[19] 王预震,路畅,吕锡香.一种新的网络脆弱性量化分析模型[J].西安工业学院学报,2005,25(6):568-571.
WANG Yu- zhen, LU Chang, LU Xi- xiang. A New Network Vulnerability Quantified Analysis Model[J].Journal of Xi'an Institute of Technology,2005,25(6):568-571.(in Chinese)

[20] 王茜.供电系统抗震可靠性分析及脆弱性评估[D].大连:大连理工大学,2012.
WANG Qian. Seismic Reliability Analysis and Vulnerability Assessment of Electric Power System[D].Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)

[21] 曹凤娟,焦明若.辽宁地区震情预测预警层次分析模型研究[J].西北地震学报,2012,34(2):167-173.
CAO Feng- juan, JIAO Ming- ruo. Study on Analytic Hierarchy Model of Early- warning of Earthquake Activity in Liaoning Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34 (2):167-173. (in Chinese)

[22] 李长明.燃气管网水力计算程序设计基础[M].北京:煤炭工业出版社,1997.
LI Chang-ming. Design Basis of Gas Network Hydraulic Calculation Procedure[M].Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1997. (in Chinese)

[23] 黄超,翁文国,吴健宏.城市燃气管网的故障传播模型[J].清华大学学报,2008,48(8):1283-1286
HUANG Chao, WENG Wen- guo, WU Jian- hong. Failure Propagation Model for City Gas pipeline Network[J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 48(8):1283- 1286.(in Chinese)