

基于蒙特卡罗法的城市燃气管网 抗震连通可靠性分析*

赵慧乾, 郭明珠, 翟长达, 石松

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:在对燃气管道进行地震反应判别的基础上, 计算管道的抗震可靠度, 并结合图论将城市燃气管网简化为源点、汇点和边线, 建立管网简化模型。采用蒙特卡罗法对某六节点网络模型进行抗震连通可靠性分析, 结果表明: 随着迭代次数的增加, 近似解以更小的误差接近精确解的概率更大; 迭代次数取为5 000时, 能够较好地满足精度要求。通过对连通性矩阵进行分析, 探讨了设定源点提高目标汇点连通可靠度的可行性。最后, 以保定市的大型燃气管网为例, 计算了Ⅶ~Ⅸ度地震烈度下管网的连通可靠度, 对比了设定源点对汇点连通可靠度的影响, 为该市燃气管网的震害预测和抗震优化提供参考。

关键词: 蒙特卡罗法; 城市燃气管网; 设定源点; 汇点; 抗震连通可靠度

中图分类号: TV352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0292-05

0 引言

城市燃气管网是城市生命线工程的重要组成部分, 也是地震次生灾害源之一 (Michael, Ronald, 1996; 周伟国等, 2009)。燃气管网的抗震研究主要包括管道单体震害机理研究和网络可靠性分析两个方面 (Li, He, 2002), 其中, 网络可靠性分析是研究热点。

目前, 网络可靠性分析方法主要有解析算法和蒙特卡罗法 (刘威, 李杰, 2002)。解析算法可以获得网络连通可靠度的精确解, 但对于大型网络 (节点超过100个) 的求解, 会因非多项式增长问题而导致计算困难。蒙特卡罗法是一种随机模拟方法, 能够给出解的近似值 (徐钟济, 1985), 在网络连通性的计算分析中不考虑拓扑结构的复杂性, 因而计算效率较高, 随着迭代次数的增加, 精度在一定范围内也会有不断提高的趋势, 但难以预测精度是否满足要求。

1 燃气管道抗震可靠度计算

1.1 管道地震反应判别

城市燃气管网主要由埋地管道构成, 其震害程度与地震动强度、场地土特质、管道特征等诸

多因素有关 (汤爱平, 欧进萍, 2002)。埋地管道在地震波作用下的可靠性分析主要有两种判别指标: 对于接口式管道, 以接口轴向形变作为判别指标; 对于连续焊接管道, 以应力作为判别指标。管道地震反应计算方法见郭恩栋等 (1996) 文献。

1.2 管道抗震可靠度预测模型

在地震作用下管道的状态功能函数设为

$$Z=f(R,S)=R-S. \quad (1)$$

式中, R 为管道判别指标的容许值, S 为管道在地震作用下判别指标的计算值。

在随机可靠性理论中, 设 R 与 S 均服从正态分布, 则 Z 也服从正态分布, 其平均值 $\mu_Z=\mu_R-\mu_S$, 标准差 $\sigma_Z=\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}$, 则对于式 (1), 结构可靠的概率可表示为

$$P_f=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z}\int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(Z-\mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}} dZ. \quad (2)$$

将 Z 标准化, 引入变量 $t(\mu_t=0, \sigma_t=1)$, 令 $t=\frac{Z-\mu_Z}{\sigma_Z}$, 则式 (2) 可简化为标准正态分布函数:

$$P_f=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt=\Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right). \quad (3)$$

* 收稿日期: 2014-01-20.

基金项目: 河北省城市活断层探测与地震危险性评价 (保定市) 项目 [冀发改投资 (2007) 1689 号] 资助.

2 燃气管网抗震连通可靠性分析

2.1 基于图论的管网简化模型

图包括点和连接各点的矢量线,它是顶点集合和顶点的有序偶集合(E·米涅卡,1984),图论正是研究图形而发展起来的理论。燃气管网通过管线和节点的相互连接构建成网络,将燃气储配站作为源点,管线交汇点、用户接入点作为汇点,管线作为连接各点的边,便可简化为图。通过分析计算不同地震烈度影响下的管段损坏的概率,对边赋予相应的权值,可以对源点与汇点的连通可靠度进行分析,进而得出网络的连通可靠度。

可用邻接矩阵 A 的形式表示图,便于进行数值分析。

$$A = [a_{ij}] \quad (4)$$

矩阵 A 中的元素用 0 和 1 进行表示, $a_{ij} = 1$ 表示节点通过一条边可以实现连通,其中 $a_{ij} = 1$ ($i = j$) 表示节点 i (j) 存在自环线,这条线在管网简化图中并不存在,但仍取值为 1。图 1 为一个含边权值的六节点网络图,1 号节点为源点,其余各点为汇点,边线上的数字为权值。

若不考虑边权值,图 1 的邻接矩阵可用 A 表示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

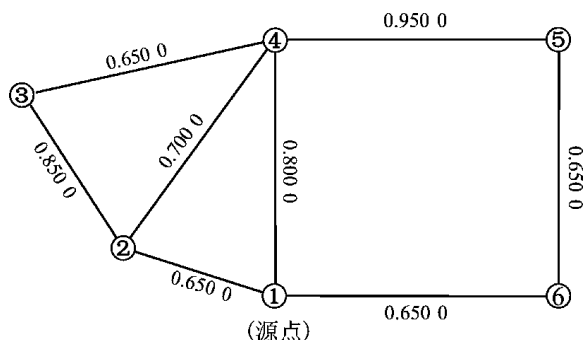


图 1 六节点网络图

Fig. 1 Six-node network diagram

图中各点能否通过若干边相互连接,可以用矩阵 M 表示:

$$M = A + A^2 + A^3 + \cdots + A^{n-1} = [m_{ij}] \quad (6)$$

式中, n 为节点数目 $m_{ij} \neq 0$ 表示节点 i, j 通过若干条管线可以实现连通,否则为不连通。

2.2 基于蒙特卡罗法的网络连通性分析

(1) 用线性同余法产生 0 到 1 之间最大周期的伪随机数 r_{ij} (吴新瞻, 吴新垣, 1990), 与计算所得的管线抗震可靠度 p_{ij} 比较, 得到所有节点的邻接矩阵 A , 矩阵中元素 a_{ij} 的取值规则为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & r_{ij} \leq p_{ij}, \\ 0, & r_{ij} > p_{ij}. \end{cases} \quad (7)$$

(2) 计算 $M = A + A^2 + A^3 + \cdots + A^{n-1}$, n 为节点数目。若 $m_{ij} \geq 1$, 则说明节点 i 和 j 之间连通; 否则不连通。应该指出, 除主对角线上的元素外, 当 M 中所有元素均不为零时, 所有节点均连通, 即可停止计算, 转入下一步骤。

(3) 将步骤 (2) 中每次迭代的计算结果变换后, 计入矩阵 T 中, $T = [t_{ij}]$ 。

$$t_{ij}^{(k+1)} = t_{ij}^{(k)} + \begin{cases} 1 & m_{ij} \geq 1, \\ 0 & m_{ij} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

式中, k 为迭代次序, 初值为 0, 令 $t_{ij}^{(0)} = 0$ 。

(4) 重复步骤 (1) ~ (3) k_{\max} 次, 即迭代次数, 便可将节点连通频率作为源点与汇点之间连通可靠度的近似值。节点连通频率矩阵记为 P , 即连通性矩阵, 可表示为

$$P = T/k_{\max} \quad (9)$$

与一般的数值模拟方法不同, 蒙特卡罗法的收敛是概率意义下的收敛, 不能断言其误差不超过某个值。将图 1 中边线上的权值视为相应边线的可靠度, 并利用蒙特卡罗法计算各汇点的连通可靠度。图 2 为针对图 1 中 2 号汇点的迭代次数与相应误差关系的散点图, 迭代次数最大为 7 000 次, 步长为 10, 共计 700 个数据。从图 2 可以看出, 迭代次数 10 ~ 3 000 次, 误差减小趋势明显; 3 000 ~ 5 000 次, 误差基本能控制在 2% 以内; 5 000 ~ 7 000 次, 误差的减少不甚明显, 但随迭代次数增加, 误差减小的趋势更为平稳, 以更小的误差接

近精确解的概率更大。

采用迭代 5 000 次的蒙特卡罗法对图 1 中每个汇点各重复计算 6 000 次, 获得 6 000 组连通可靠度数据, 用显著水平为 0.000 063 的置信区间表示近似解, 并与全概率分解法 (梅启智等, 1992) 计算的精确解对比, 可以看出蒙特卡罗方法在大量数据支撑下, 能够无限逼近精确解 (表 1)。由于实际应用中一般只计算一组连通可靠度数据, 即单次模拟, 再用这 6 000 组数据的均值与标准差来表示单次模拟所求近似解的精度。

从表 1 和图 2 可以看出, 利用蒙特卡罗法迭代 5 000 次, 能够将近似解的精度控制在一定的范围, 根据管线的抗震可靠度计算精度的实际需求, 可以直接应用单次模拟所求近似解。

网络连通性分析中, 在不改变拓扑结构的情况下, 汇点的连通可靠度与源点的相对位置有一定的关系, 这在连通性矩阵 P_{ij} 中有所表现, 第 i 行中的每一个元素代表汇点 ($j \neq 1$) 与设定源点的连通性。图 1 的连通性矩阵中, 元素与设定源点、汇

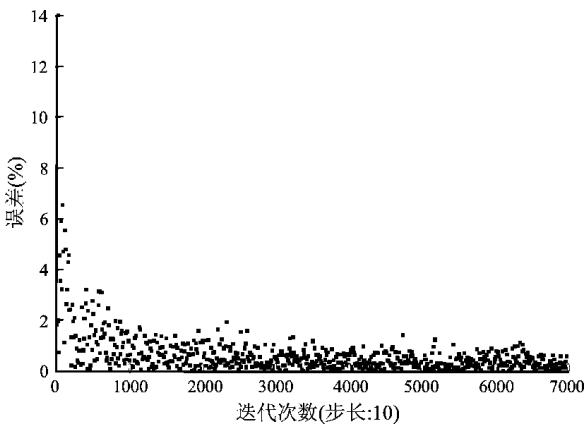


图 2 迭代次数与误差关系散点图

Fig. 2 The scatter plot of the relationship between iterations number and error

表 1 源点与汇点连通可靠度

Tab. 1 The connectivity reliability of the source and sink nodes

汇点编号	精确解	近似解的置信区间 (重复模拟 6 000 次)	单次模拟的近似解
2	0.916 7	(0.916 9 ± 0.000 2)	(0.916 9 ± 0.004 0)
3	0.878 0	(0.878 1 ± 0.000 3)	(0.878 1 ± 0.004 6)
4	0.947 7	(0.947 8 ± 0.000 2)	(0.947 8 ± 0.003 1)
5	0.923 2	(0.923 3 ± 0.000 2)	(0.923 3 ± 0.003 7)
6	0.847 2	(0.847 3 ± 0.000 3)	(0.847 3 ± 0.005 1)

点的对应关系见表 2。通过连通性矩阵 P_{ij} 可以看出, 选取不同的节点作为源点, 对诸多节点的连通可靠度有一定程度影响。

表 2 连通性矩阵中源汇点对应关系

Tab. 2 The corresponding relations between source and sink nodes in the connectivity matrix

设定源 点编号	汇点编号					
	1	2	3	4	5	6
1	*	0.914 0	0.874 6	0.945 8	0.920 2	0.842 6
2	0.914 0	*	0.937 6	0.943 8	0.914 4	0.802 4
3	0.874 6	0.937 6	*	0.908 8	0.880 2	0.773 0
4	0.945 8	0.943 8	0.908 8	*	0.967 8	0.840 8
5	0.920 2	0.914 4	0.880 2	0.967 8	*	0.844 4
6	0.842 6	0.802 4	0.773 0	0.840 8	0.8444	*

注: * 为节点与自身的连通可靠度, 不作讨论。

3 工程实例

3.1 工程概况

保定市城区燃气管网总长约 229 km, 设计压力分级为中压 A (0.4 MPa)、中压 B (0.03 ~ 0.07 MPa) 和低压 (1.1 ~ 2.2 kPa)。由于中压 A 管网以燃气储配站为供气源, 独立成系统, 可单独进行分析。中压 A 管网于 2002 年初投入使用, 主要采用无缝钢管和 Q235B 直焊缝钢管, 公称直径为 250 ~ 500 mm。市区场地土以Ⅲ类场地为主, 部分地区为Ⅱ类场地。

3.2 管网抗震连通性分析

现以燃气储配站为源点, 将中压 A 管网简化为 113 个节点、141 条边线的大型网络图 (图 3)。以应力为判别指标, 计算各管线在Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度地震烈度下的抗震可靠度, 并赋权给相应的边线, 再用蒙特卡罗法迭代 5 000 次, 求得不同汇点与源点的连通可靠度。

在不同地震烈度下, 选取不同节点作为设定源点会对汇点抗震连通可靠度造成不同程度的影响。表 3 为在Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度地震烈度情况下, 选取 39 号节点为设定源点时, 与 1 号节点 (燃气储配站) 为源点时相比, 部分汇点抗震连通可靠度变化幅度。从表中可以看出, 在不同地震烈度下, 设定源点对某些汇点连通可靠度的影响存在一定差别。

通过分析连通性矩阵可知，设定源点以改善局部重要节点或大部分节点的抗震连通可靠度是可行的（表 4）。设定较优的源点，需要通过分析连通性矩阵，综合评定。如选取 39 号节点为设定源点，与 1 号节点为源点时相比，所有汇点抗震连通可靠度平均提高幅度为：Ⅶ度情况下，排名第 1 位，为 10.22%；Ⅷ度情况下，排名第 8 位，为 36.46%，但与排名首位的节点仅相差 1.26%；Ⅸ度时，排名仅第 25 位，为 203.55%，但此时汇点的连通可靠度已经普遍较低，排名高位也难以在实质上提高汇点的供气能力。此外，Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度情况下，连通可靠度 ≥ 0.8000 的汇点数目分别为 81、30 和 0，与排名首位的节点相比，相差分别仅为 1、6 和 4。因此，39 号节点为较优的设定源点。

较优的设定源点多分布在管线密集的市中心，因此要考虑实际情况，在市区边缘选择合适的节点作为源点，而同时也需要着重对源点周边的网络拓扑结构进行优化。

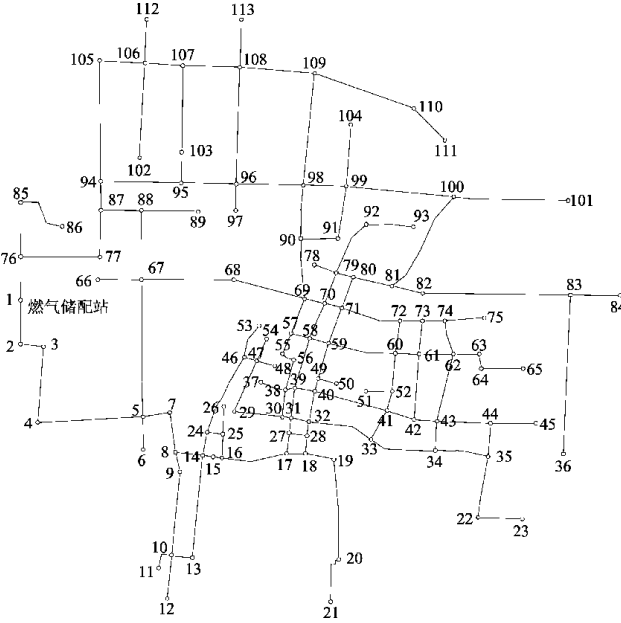


图 3 中压 A 管网简化网络图
Fig. 3 Simplified network diagram of medium voltage A pipe network

表 3 不同地震烈度下设定源点对汇点连通可靠度的影响程度

Tab. 3 The impact of the setting source point on the connectivity reliability of sink nodes under different earthquake intensities									
汇点 编号	汇点抗震连通可靠度								
	Ⅶ度			Ⅷ度			Ⅸ度		
	设定源点编号		变化幅度 (%)	设定源点编号		变化幅度 (%)	设定源点编号		变化幅度 (%)
	1	39		1	39		1	39	
78	0.811 8	0.905 4	11.53	0.352	0.523 2	48.64	0.027 4	0.101 6	270.80
79	0.887 2	0.988 4	11.41	0.542 8	0.817 2	50.55	0.094 4	0.332 2	251.91
80	0.893 4	0.995 8	11.46	0.561 6	0.847 2	50.85	0.056 4	0.260 4	361.70
81	0.882 8	0.982 2	11.26	0.517 4	0.697 6	34.83	0.090 0	0.104 8	16.44
82	0.809 2	0.901 0	11.34	0.405 2	0.547 2	35.04	0.055 6	0.062 6	12.59
83	0.745 0	0.830 8	11.52	0.350 8	0.471 6	34.44	0.040 8	0.047 8	17.16
84	0.684 0	0.761 8	11.37	0.307 2	0.407 8	32.75	0.031 6	0.039 8	25.95

表 4 不同地震烈度下设定源点的优劣对比

Tab. 4 The merits and demerits comparison of the setting source point under different earthquake intensities					
连通可靠度 ≥ 0.8000 的汇点数目	设定源点编号 (Ⅶ度)	连通可靠度 ≥ 0.8000 的汇点数目	设定源点编号 (Ⅷ度)	连通可靠度 ≥ 0.8000 的汇点数目	设定源点编号 (Ⅸ度)
1	{1}	3	{1}	1	{1、2、3、4、5、13、15、 17、27、41、42、110}
2	{2、21、23、36、54、84、 86、101、102、111}	2	{10、13、16、17、19、 20、81、85、92}	2	{27、40、107}
81	{32、39、40、41、61、69}	36	{90}	3	{96}
82	{58、59、60、70、71}	42	{69}	4	{98、108、109}

注：表中最后一行数据分别为Ⅶ~Ⅸ度地震烈度下，连通可靠度 ≥ 0.8000 的汇点数目最大值及其设定源点编号集合。

4 结语

在城市燃气管网抗震连通可靠性分析中利用蒙特卡罗法,迭代 5 000 次即能满足相应的精度要求。

每个汇点与源点的连通可靠性与管道单体的抗震可靠性有关,但单纯依靠增大管径或采用抗震新型管材,经济成本较大。管网各汇点的抗震可靠性与源点的相对位置密切相关,需要综合实际情况来选取地理位置合适的源点。此外,增设新的源点或改善管网的拓扑结构来提高整个系统抗震可靠性也是很有成效的途径,但如何在一定的时间跨度内经济合理地实现这一目的,有待进一步研究。

本文资料的收集工作得到了保定市委、市政府,保定市科技局(地震局),保定市燃气总公司等有关部门和单位的支持和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 郭恩栋,冯启民,王亚东. 1996. 城市供水系统抗震可靠性分析及对策研究[J]. 地震工程与工程振动,16(3):104-113.
- 刘威,李杰. 2002. 生命线网络可靠度分析的改进最小路递推分解算法[J]. 地震工程与工程震动,29(5):66-72.
- 梅启智,廖炯生,孙惠中. 1992. 系统可靠性工程基础[M]. 北京:科学出版社.
- 汤爱平,欧进萍. 2002. 城镇埋地管网震害特征与破坏机理[J]. 地震工程与工程震动,22(4):120-126.
- 吴新瞻,吴新垣. 1990. 随机模型与计算机模拟[M]. 北京:电子工业出版社.
- 徐钟济. 1985. 蒙特卡罗方法[M]. 上海:上海科学技术出版社.
- 周伟国,张中秀,孔令令. 2009. 城市燃气管网的震害分析及减灾对策[J]. 土木建筑与环境工程,31(4):70-75.
- E·米涅卡. 1984. 网络和图的最优化算法[M]. 北京:中国铁道出版社.
- Li J., He J. 2002. A Recursive Decomposition Algorithm for Network Seismic Reliability Evaluation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,31(8):1525-1539.
- Michael K. L., Ronald W. P. 1996. Identifying and Managing Conjoint Threats: Earthquake-induced Hazardous Materials Releases in the US [J]. Journal of Hazardous Materials,50(1):31-46.

Analysis of Anti-seismic Connectivity Reliability of City Gas Pipeline Network Based on Monte Carlo Method

ZHAO Hui-qian, GUO Ming-zhu, ZHAI Chang-da, SHI Song

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

Based on discriminating the seismic response of gas pipeline, we calculated the anti-seismic reliability of the pipe, and combined with graph theory, we simplified the city gas pipeline network as the source point, sink point and sideline to establish the simplified model of pipeline network. Then we analyzed the anti-seismic connectivity reliability of a certain six-node network model by Monte Carlo method. The results showed that with the increasing of iterations number, the probability of the approximate solution close to the exact solution with a smaller error is greater. Setting the number of iterations as 5 000 could better meet the precision requirement. Based on the analysis of the connectivity matrix, we discussed the feasibility of improving the connectivity reliability of the target sink point by using the setting source point. At last, taking the large-scale gas pipeline network in downtown Baoding as an example, we calculated the connectivity reliability of pipeline network under earthquake intensities from VII to IX degree, and compared the impact of the setting source point on the connectivity reliability of all the sink nodes, which could provide references for the seismic damage prediction and anti-seismic optimization of gas pipeline network in the study city.

Key words: Monte Carlo method; city gas pipeline network; set source node; sink node; anti-seismic connectivity reliability