

# 具有中介状态的燃气管网连通可靠度

王清树<sup>1,2</sup>, 谭羽非<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, wqs821315131420@yahoo.com.cn;

2. 苏州科技学院 环境科学与工程学院, 215009 江苏 苏州)

**摘要:** 为了提高管网连通可靠度, 介绍了燃气管网在中介状态下工作的可能性, 建立燃气管网“安全—中介—失效”3级连通可靠度模型, 改进了燃气管网管段单元只具有有效和失效2种工作状态. 对复杂的燃气管网多个环状网络系统, 采用桥管段单元全概率分级分解模型, 化为简单的混联系统进行燃气管网连通可靠度的向量求解. 针对管段单元间的相关性, 考察相关性参数对复杂燃气管网系统连通可靠度的影响, 增加了燃气管网连通可靠度计算的可信度.

**关键词:** 燃气管网; 桥管段单元; 连通可靠度; 可靠度向量

**中图分类号:** TU996 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0102-04

## The connectivity-reliability analysis of gas pipeline network with intermediate state

WANG Qing-shu<sup>1,2</sup>, TAN Yu-fei<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, wqs821315131420@

yahoo.com.cn; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University Science and Technology, 215009 Suzhou, Jiangsu, China)

**Abstract:** To improve connectivity-reliability of gas pipeline network the possibility of gas pipe network with intermediate state before failure is expounded. Based on the improved two states with safety and failure of pipe unit, a three-stage connectivity reliability work mode of safety-intermediate-failure is established. Through adopting hierarchical exploded mode of full probability, multi-loop gas pipe network with bridge circuit can be broken down into several simple compound pipe systems for reliability vector solving. The influence of correlation parameter among pipe units to connectivity reliability of gas pipe network is considered and the trust in connectivity reliability calculation is increased in this paper.

**Key words:** gas pipeline network; pipe network with bridge circuit; connectivity-reliability; reliability vector

针对燃气管网系统连通可靠度, 文献[1-2]都假定管段单元只具有有效和失效2种工作状态, 且管段单元间相互独立. 燃气管网系统运行时, 从“有效”到“失效”是逐渐过渡的, 存在中介即虽有损伤却仍能工作的状态, 可靠度计算应该采用“安全—中介—失效”3级可靠度模型<sup>[3]</sup>. 本文研究具有中介状态时燃气管网的连通可靠度向

量, 并考察管段单元相关性系数对管网系统可靠度的影响. 该方法求解燃气管网连通可靠度比常规利用模糊数学的方法求解更简便、实用, 合理考虑中介状态更符合燃气管网运行的实际状态, 提高燃气管网连通可靠性的可信度<sup>[4]</sup>.

### 1 管段单元可靠度向量

燃气管网系统的每个单元, 包括阀门、压缩机、调压站等节点单元和管段单元都可以看作单体结构, 每个单元的安全概率、中介概率和失效概率合起来称为可靠度向量. 假设管段单元只具有单约束条件, 其“安全—中介—失效”3级可靠度

收稿日期: 2010-12-21.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAJ16B03).

作者简介: 王清树(1982—), 男, 博士;

谭羽非(1966—), 女, 教授, 博士生导师.

模型为

安全状态:  $S \leq R^s$ ;

中介状态:  $R^s < S < R^f$ ;

失效状态:  $S \geq R^f$ .

其中:  $S$  为单约束单元荷载效应;  $R^s$ 、 $R^f$  分别为单约束单元安全抗力的上、下限.

管段单元可依据单元的 3 级可靠度模型, 首先考虑腐蚀等因素, 求出安全抗力的上、下限值, 再根据荷载的大小, 利用概率论求出其可靠度向量<sup>[5]</sup>.

## 2 燃气管网系统可靠度向量

### 2.1 2 个管段单元串联或并联可靠度向量

最简单的燃气管网是由 2 个管段单元构成串联或并联系统<sup>[6]</sup>. 串联系统安全概率是各管段单元安全事件的“交”运算, 失效概率是各管段单元的“并”运算; 并联系统安全概率是各管段单元安全事件的“并”运算, 失效概率是各管段单元的“交”运算. 若 2 个管段单元安全事件  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  存在一定的相关性, 可采用相关性因子  $\lambda$  计算得到安全概率和失效概率.

串联时:

$$R = \frac{R_1 R_2}{1 - (1 - \lambda)(1 - R_1)(1 - R_2)}, \quad (1)$$

$$F = 1 - \frac{(1 - F_1)(1 - F_2)}{1 - (1 - \lambda)F_1 F_2}. \quad (2)$$

并联时:

$$R = 1 - \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{1 - (1 - \lambda)R_1 R_2}, \quad (3)$$

$$F = \frac{F_1 F_2}{1 - (1 - \lambda)(1 - F_1)(1 - F_2)}. \quad (4)$$

式中:  $R$  为安全概率;  $F$  为失效概率;  $\lambda$  为燃气管段单元间的相关性因子,  $0 < \lambda \leq 1$ .

燃气管网管段单元或网络系统的安全概率  $R$ 、失效概率  $F$  和中介概率  $M$  之间的关系为

$$R + F + M = 1. \quad (5)$$

### 2.2 多个管段单元网络系统可靠度向量

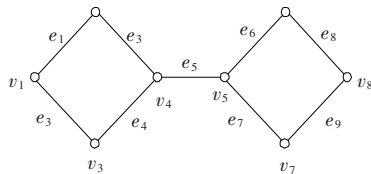
多个管段单元间可构成纯串联或纯并联管网系统, 其安全概率和失效概率的计算方法可由式 (1) ~ (4) 递推得到, 多个管段单元间还可构成混联管网系统, 如图 1 所示.

串并联管网系统的安全概率计算形式为

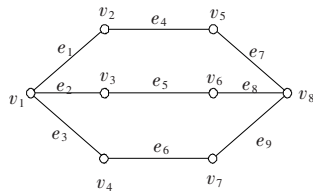
$$\Omega = \bigcap_{n=1}^N \bigcup_{m=1}^{M_n} \Omega_{nm}. \quad (6)$$

失效概率应采用计算形式为

$$\bar{E} = \bigcup_{n=1}^N \bigcap_{m=1}^{M_n} \bar{E}_{nm}. \quad (7)$$



(a) 先并后串



(b) 先串后并

图 1 混联管网系统

计算安全概率时将中介状态与失效状态合并为“非安全”状态; 计算时失效概率将中介状态与安全状态合并为“非失效”状态. 设串并联管网系统共由  $N$  列子系统串联, 子系统中各管段单元为并联. 第  $n$  列管网子系统考虑单元间相关性时的安全概率  $R^{(n)}$ 、失效概率  $F^{(n)}$  和中介概率  $M^{(n)}$  分别为

$$\begin{cases} R^{(n)} = R_{12 \dots M}^{(n)} = 1 - \frac{(1 - R_{n,12 \dots (M-1)})(1 - R_{nM})}{1 - (1 - \lambda)R_{n,12 \dots (M-1)}R_{nM}}, \\ F^{(n)} = F_{12 \dots M}^{(n)} = \frac{F_{n,12 \dots (M-1)}F_{nM}}{1 - (1 - \lambda)(1 - F_{n,12 \dots (M-1)})(1 - F_{nM})}, \\ M^{(n)} = 1 - R^{(n)} - F^{(n)}. \end{cases} \quad (8)$$

串联得到串并联混合管网系统的可靠性向量分别为

$$\begin{cases} R = R^{(12 \dots N)} = \frac{R^{12 \dots (N-1)}R^{(N)}}{1 - (1 - \lambda)(1 - R^{12 \dots (N-1)})(1 - R^{(N)})}, \\ F = F^{(12 \dots N)} = 1 - \frac{(1 - F^{(12 \dots (N-1))})(1 - F^{(N)})}{1 - (1 - \lambda)F^{(12 \dots (N-1))}F^{(N)}}, \\ M = 1 - R - F. \end{cases} \quad (9)$$

各管段单元相互独立 ( $\lambda = 1$ ) 时, 串并联管网系统的安全概率  $R$  和失效概率  $F$  可由以下公式得到. 并串联管网系统只需要将串并联系统的计算方法反过来即可.

$$R^{(n)} = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - R_{nm}), \quad (10)$$

$$F^{(n)} = \prod_{m=1}^M F_{nm} = F_{n1}F_{n2} \dots F_{nM}, \quad (11)$$

$$R = \prod_{n=1}^N R^{(n)} = \prod_{n=1}^N [1 - \prod_{m=1}^M (1 - R_{nm})], \quad (12)$$

$$F = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - F^{(n)}) = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - \prod_{m=1}^M F_{nm}). \quad (13)$$

### 2.3 燃气管网多环网络系统可靠度向量

燃气管网为多环网络系统,为简化计算,将其合并为“安全—非安全”模式结构<sup>[7]</sup>. 对于2个相邻的环状管网系统,分解为1个大的环状管网系统和1个桥管段单元构成,全概率分解公式见文献<sup>[8]</sup>. 图2(a)为简单燃气管网桥式系统,选择桥管段单元  $e_5$  进行分解,当桥管段单元  $e_5$  正常时,系统可以分解为管段单元  $e_1$  与  $e_2, e_3$  与  $e_4$  分别并联后再串联的混联系统,如图2(b)所示;当桥管段单元  $e_5$  失效时,系统可以分解为管段单元  $e_1$  与  $e_3, e_2$  与  $e_4$  分别串联后再并联的混联系统,如图2(c)所示.

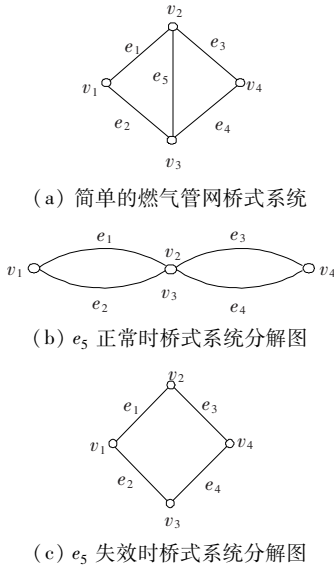


图2 简单燃气管网桥式系统桥管段  $e_5$  分解图

### 3 具有中介状态的燃气管网连通可靠度算例

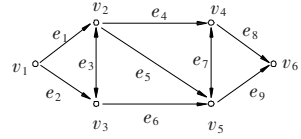
图3(a)为带有桥管段单元的燃气管网,以其为例,计算管段单元具有中介状态时,源点  $v_1$  到汇点  $v_6$  的管网连通可靠度. 管段单元可靠度依次为:  $\Psi_1 = [0.95, 0.03, 0.02], \Psi_2 = [0.95, 0.03, 0.02], \Psi_3 = [0.80, 0.10, 0.10], \Psi_4 = [0.90, 0.05, 0.05], \Psi_5 = [0.90, 0.05, 0.05], \Psi_6 = [0.90, 0.05, 0.05], \Psi_7 = [0.80, 0.15, 0.05], \Psi_8 = [0.90, 0.05, 0.05], \Psi_9 = [0.95, 0.02, 0.03]$ .

将图3(a)所示系统按桥管段单元依次分解. 应用 Matlab 编程,取相关性参数  $\lambda = 0.2$ ,可得图3(b)的安全概率  $R_b = 0.9654$ ,失效概率  $F_b = 0.0093$ . 图3(d)的安全概率  $R_d = 0.9483$ ,失效概率  $F_d = 0.0163$ ;图3(e)的安全概率  $R_e = 0.9328$ ,失效概率  $F_e = 0.0239$ ;图3(f)的安全概率  $R_f = 0.9327$ ,失效概率  $F_f = 0.0208$ ;

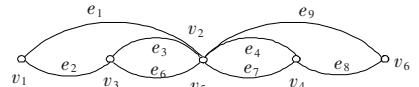
图3(g)的安全概率  $R_g = 0.9193$ ,失效概率  $F_g = 0.0298$ . 整个系统的安全概率可用“安全—非安全”可靠度模式计算.

$$R = R_5 \times R_b + F_5 \times [R_3 \times (R_7 \times R_d + F_7 \times R_e) + F_3 \times (R_7 \times R_f + F_7 \times R_g)] = 0.9632.$$

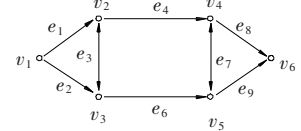
$$F' = R_5 \times F_b + F_5 \times [R_3 \times (R_7 \times F_d + F_7 \times F_e) + F_3 \times (R_7 \times F_f + F_7 \times F_g)] = 0.0368.$$



(a)燃气管网桥式系统



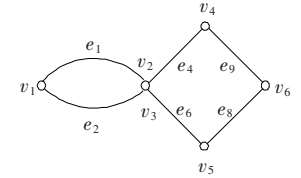
(b)  $e_5$  正常时



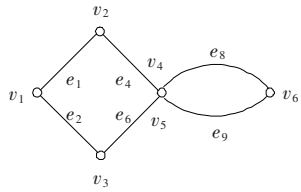
(c)  $e_5$  失效时



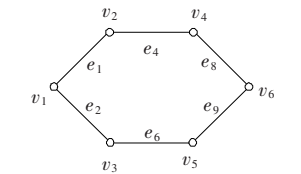
(d)  $e_5$  失效、 $e_3$  正常、 $e_7$  正常时



(e)  $e_5$  失效、 $e_3$  正常、 $e_7$  失效时



(f)  $e_5$  失效、 $e_3$  失效、 $e_7$  正常时



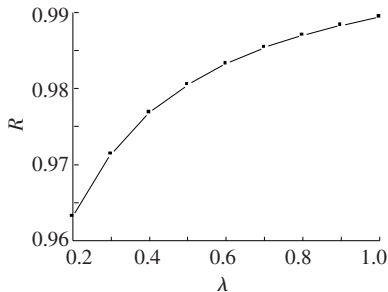
(g)  $e_5$  失效、 $e_3$  失效、 $e_7$  失效时

图3 燃气管网桥式系统分级分解图

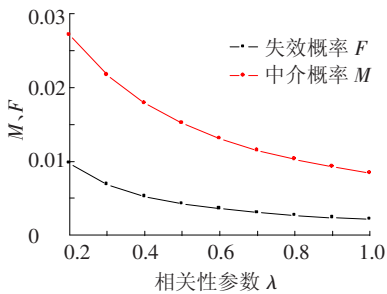
整个系统的失效概率可用“非失效—失效”可靠度模式计算,得  $R' = 0.9903; F = 0.0097$ . 中介概率由式(5)得  $M = 1 - R - F = 1 - 0.9632 - 0.0097 = 0.0271$ . 图3(a)系统的可靠度向量  $\Psi = [0.9632, 0.0271, 0.0097]$ .

## 4 相关性的影响分析

管网系统包含的管段单元数越多,相关性系数的影响就越大<sup>[9]</sup>.用 Matlab 程序进行计算并绘制图 3 (a)所示燃气管网桥式系统可靠度向量与相关性参数关系曲线,如图 4 所示.



(a) 系统安全概率与相关性参数的关系



(b) 系统中介概率、失效概率与相关性参数的关系

图 4 燃气管网桥式系统可靠度向量与相关性参数关系

由图 4 可知,燃气管网多环网络系统安全概率  $R$  随管段单元间相关性程度的减小(相关性参数  $\lambda$  增加)而增加;失效概率  $F$  和中介概率  $M$  随管段单元间相关性程度的增加而增大.

## 5 结论

1) 采用具有中介状态的“安全—中介—失效”3级可靠度模型,更符合燃气管网实际运行特征,采用桥管段单元分级分解模型计算燃气管网

系统的可靠度向量,是简单可行的.

2) 管段单元间相关性参数  $\lambda$  对管段单元串联、并联及桥式系统的影响是较明显的,与不考虑管段单元间相关性相比,串联燃气管网安全可靠度偏大,并联管网安全可靠度偏小.对大型复杂燃气管网应该作一定的简化,并考虑重要管段单元间的相关性情况,能提高安全可靠度计算的准确性和可信度.

## 参考文献:

- [1] 严铭卿. 燃气输配工程分析[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
- [2] 刘小坛. 城市供燃气管网系统的抗震可靠度优化[D]. 上海:同济大学,2007:77-81.
- [3] WANG Guangyuan, WANG Wenquan. Fuzzy reliability analysis of seismic structures[J]. Acta Mechanica Sinica, 1986, 2(4): 7-13.
- [4] 王光远,张鹏. 具有中介状态的工程系统的可靠性分析[J]. 土木工程学报,2001,34(3):13-17.
- [5] KIUREGHIAN A D, MOGHADDERI-ZADEH M. An integrated approach to the reliability of engineering system [J]. Nuclear Engineering and Design, 1982, 71(4): 349-354.
- [6] 白建辉,汪玉春,郜峰,等. 天然气管网稳态分析综合方法[J]. 油气储运,2009,28(2):37-39.
- [7] 张磊,韩阳,王威. 具有中介状态长输管线失效故障树的可靠性分析[J]. 河南科学,2008,26(5):571-574.
- [8] 乔铁,刘冬华. 用图形分解和矩阵消减解决网络连通可靠性问题[J]. 科技信息,2009(9):67-68.
- [9] 张鹏,吴燕,胡秀庄,等. 具有中介状态和失效相关时表决工程系统的可靠性分析[J]. 四川大学学报,2006,38(3):152-158.

(编辑 魏希柱)