

# 城市燃气管网的故障传播模型

黄超, 翁文国, 吴健宏

(清华大学 工程物理系, 公共安全研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 燃气管网的局部破裂可能导致大片区域发生停气事故。为了模拟城市燃气管网破裂泄漏的故障传播范围及影响程度,进而为事故的预防工作提供科学的依据,该文综合研究了2种情况,即燃气管网节点破裂和管段破裂,把管段及节点计算流量子模型、燃气泄漏子模型以及管网压力分布计算子模型有机结合起来,建立了城市燃气管网的故障传播模型。并在此基础上进行了实际燃气管网的计算与分析。结果表明:该模型能够有效地预测燃气管网破裂泄漏的故障传播范围和影响程度。

**关键词:** 故障传播; 燃气管网; 破裂泄漏; 水力计算; 压力分布

中图分类号: X 937; X 913

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2008) 08-1283-04

## Failure propagation model for city gas pipeline network

HUANG Chao, WENG Wenguo, WU Jianhong

(Center for Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A crack in a gas pipeline network can disrupt gas supplies to a large area. A failure propagation model for a city pipeline network was developed to simulate the scope of the failure propagation to provide a scientific basis for accident prevention. The model combined pipe-node flow model, gas leakage model, and pipeline network pressure distribution model was developed based on taking both node crack and pipe crack into consideration. Analyses of actual gas pipeline networks indicate that the model can successfully predict the scope of the failure propagation in a gas pipeline network.

**Key words** failure propagation; gas pipeline network; crack leakage; hydraulic calculation; pressure distribution

燃气管网作为城市生命线的一部分,为维系城市的功能发挥着重要的作用,但这种规模巨大的网络应对蓄意攻击很脆弱。在燃气管网上发生的局部节点或管段破裂泄漏,可能导致大面积区域用户发

生停气事故,从而使该区域居民的生活和工业企业用户的生产受到巨大影响。目前关于城市燃气管网方面的研究主要集中在以下3个方面:一是燃气管网及其水力计算软件的设计及优化<sup>[1-3]</sup>,二是燃气管网上气体泄漏的原因及危险性分析<sup>[4-5]</sup>,三是燃气管网的风险评估<sup>[6-8]</sup>。另外,一些研究者也做管网安全性实时监控方面的研究<sup>[9]</sup>。

这些工作能够从特定的角度探讨和解决燃气管网上存在的安全问题,但是并没有涉及燃气管网上局部泄漏故障对整个管网上用户的影响,在某种意义上来说,这种影响可能会对整个城市的生活生产造成巨大损失。本文以这个问题为切入点,建立管段及节点计算流量子模型、燃气泄漏子模型、燃气管网压力分布计算子模型,并把它们有机地结合起来,建立燃气管网故障传播模型。

### 1 燃气管网故障传播模型的建立

本模型的建立思想为:燃气管网在计算流量的工况下(由管段及节点计算流量子模型计算得到),结合燃气泄漏子模型和燃气管网压力分布计算子模型,模拟计算管网在某一节点或管段发生破裂泄漏情况下整个管网的压力分布,根据用户的需求压力,判断破裂泄漏对整个燃气管网上用户的影响。

在建立模型之前,需要确定燃气网络的节点和管段。在本文模型中,选择节点的依据是:1)根据图论理论,对整个燃气管网的连通性影响重大的元部件。2)燃气管网上本身具有的重要设施。因此,我们选取以下元部件作为节点:a)接收站;b)储配站;c)燃气调压室;d)小区燃气入口处;e)集

收稿日期: 2007-11-06

基金项目: 清华大学工程物理系科学研究基金项目(110041706)

作者简介: 黄超(1985-),男(汉),江西,硕士研究生。

通讯联系人: 翁文国,副研究员,

E-mail: wgweng@tsinghua.edu.cn

中负荷入口处。管段即为连接两节点的管道

### 1.1 管段及节点计算流量子模型

该子模型的作用有二,一是简化燃气管网的负荷、结构,将复杂的燃气途泻流量转化为当量集中流量;二是在没有设计性数据的情况下,可以利用这个子模型得出水力计算子模型的计算初值,包括节点流量和管段流量。根据文[10],管段的计算流量 $q_{V,P}$ 可用下式求得:

$$q_{V,P} = 0.55q_{V,1} + q_{V,2}. \quad (1)$$

式中: $q_{V,1}$ 和 $q_{V,2}$ 分别为途泻流量和转输流量

管网的节点流量 $q_{V,N}$ 可以根据途泻流量以及集中流量来确定:

$$q_{V,N} = 0.55q_{V,in} + 0.45q_{V,out} + q_{V,col}. \quad (2)$$

式中: $q_{V,in}$ 为流入该节点的途泻流量; $q_{V,out}$ 为流出该节点的途泻流量; $q_{V,col}$ 为集中流量

### 1.2 燃气泄漏子模型

由施加外力或压力过高造成的开裂泄漏通常会导致管道压力明显降低,对管网压力分布影响最大。考虑流体的音速和亚音速流动两种情况,燃气泄漏的体积流量 $q_{V,leak}$ 分别按照式(3)和(4)计算<sup>[11]</sup>:

$$q_{V,leak} = \frac{C_{dg} A p}{d} \frac{\kappa M}{RT} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}},$$

$$\text{当 } \frac{p_0}{p} \leq \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \text{ 时}; \quad (3)$$

$$q_{V,leak} = \frac{C_{dg} A p}{d} \frac{\kappa M}{RT} \left( \frac{\kappa}{\kappa - 1} \right) \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right],$$

$$\text{当 } \frac{p_0}{p} > \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \text{ 时}. \quad (4)$$

式中: $p_0$ 为环境压力; $p$ 为管道压力; $\kappa$ 为气体绝热指数; $A$ 为泄漏口面积; $d$ 为燃气密度; $C_{dg}$ 为气体泄漏系数; $M$ 为燃气的分子量; $R$ 为气体常数; $T$ 为气体温度。

### 1.3 燃气管网压力分布计算子模型

#### 1.3.1 基本原理

在燃气管网压力分布计算子模型中,先对管段压降方程进行线性化处理,然后逐步进行节点压力、管段压降、管段流量计算

根据文[12],对于一个有 $m$ 个节点、 $n$ 段管段的燃气管网,其水力计算公式的数学表达式均可线

性化为

$$\Delta p = S' q_{V,pipe}. \quad (5)$$

式中 $\Delta p$ 为管段压降,对于低压管道有 $\Delta p = p_1 - p_2$ ;对于高中压管道,有 $\Delta p(j) = [p_1(j)]^2 - [p_2(j)]^2$ , $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $q_{V,pipe}$ 为管段流量

对于低压燃气管网和高中压燃气管网,根据文[10],对角阵 $S'$ 中元素 $S'(j,j)$ 可按照以下两式分别求得:

$$S'(j,j) = 6.26 \times 10^7 d \frac{q_{V,pipe}(j) T L(j)}{[d(j)]^5 T_0}, \quad (6)$$

$$S'(j,j) = 1.27 \times 10^{10} d \frac{q_{V,pipe}(j) T Z L(j)}{[d(j)]^5 T_0}. \quad (7)$$

式(6)、(7)中: $L(j)$ 为管段 $j$ 的长度; $d$ 为燃气密度; $d(j)$ 为管道 $j$ 直径; $\lambda$ 为燃气管道沿程阻力系数; $T_0$ 取为273.16 K; $Z$ 为压缩因子。

节点压力 $p$ 由下式计算得到:

$$Y p = q_{V,node}. \quad (8)$$

方程(8)中, $Y$ 为管网的导纳矩阵,可按式计算得到:

$$Y = A(S')^{-1} A^T. \quad (9)$$

式中: $A$ 为管网连接矩阵,对于一个有向图(管网),连接矩阵各元素的取值由下式确定<sup>[12]</sup>:

$$A(i,j) = \begin{cases} 0, & \text{节点 } i \text{ 不在管段 } j \text{ 上;} \\ 1, & \text{节点 } i \text{ 在管段 } j \text{ 末端;} \\ -1, & \text{节点 } i \text{ 在该管段 } j \text{ 首端.} \end{cases} \quad (10)$$

管段压降 $\Delta p$ 由下式计算:

$$A^T p = \Delta p. \quad (11)$$

管段流量 $q_{V,pipe}$ 按式(12)计算得到:

$$q_{V,pipe} = (S')^{-1} \Delta p. \quad (12)$$

#### 1.3.2 管网压力分布模拟计算算法设计

该子模型考虑2种情形:节点破裂泄漏和管段破裂泄漏。

##### 1) 节点破裂泄漏情形

以管网的管段及节点计算流量子模型计算得到的计算流量作为水力计算的输入,逐步计算管段的 $S'$ 、管网导纳矩阵 $Y$ 、管网的节点压力 $p$ 、泄漏口处流量 $q_{V,leak}$ 、管段压降 $\Delta p$ 以及管段流量 $q_{V,pipe}$ 。在进行管网水力计算时,通过不断修正 $S'$ 值进行迭代,直到前后两次计算的 $q_{V,pipe}$ 值差值小于规定的阈值,此时各节点压力即为所求。对于多气源情形,还要做相应处理:对于给定压力气源,则要修正节点流量;对于给定流量气源,则将气源当作节点来处理,但气

节点流量为负值 其具体计算流程如图 1 所示。

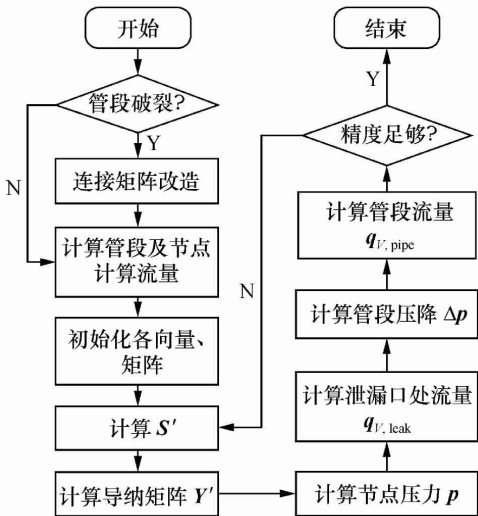


图 1 管网压力分布模拟计算流程图

2) 管段破裂泄漏情形。

进行管段破裂泄漏情形计算时,应对管网连接矩阵进行改造。使之满足上述模型的计算要求。在改造过程中,应使原来的矩阵行向量和列向量各增加一维,即将 $A(m,n)$ 改造成为 $A(m+1,n+1)$ 。为了说明该方法,现以 $S$ 为起点 $T$ 为终点的 $k$ 管段为例。在 $k$ 管段上发生破裂泄漏,则视泄漏口为管网的一个节点 $O$ ,如图 2 所示。此时 $A$ 矩阵要作相应的改造,先将 $A(m+1,n+1)$ 所有元素初始化为 0,在此基础上作如下赋值: $A[T,k]=0, A[O,k]=1, A[O,n]=-1, A[T,n]=1$ ,而其他元素与改造前的矩阵相同,具体算法见图 3 而破裂泄漏后管段 $k$ 和 $n$ 的流量初值赋值为破裂泄漏前管段 $k$ 的计算流量值,节点 $O$ 的节点流量初值赋值为 0

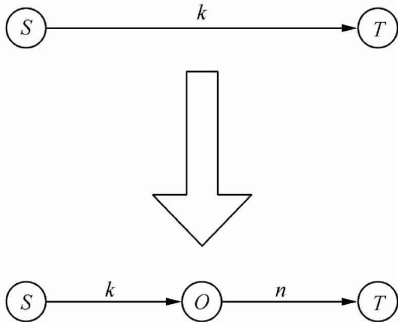


图 2 连接矩阵改造过程

2 基于实际管网的计算分析

图 4 是某实际中压燃气管网<sup>[12]</sup>,在本燃气管网中,管网的管段计算流量和节点计算流量已经确定。图上所标示的参数均为模拟计算的初值

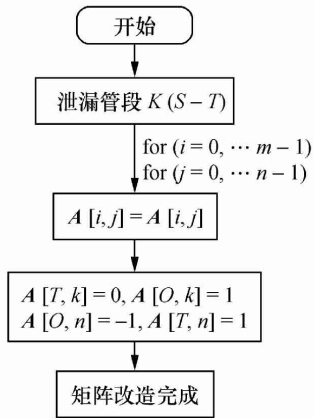
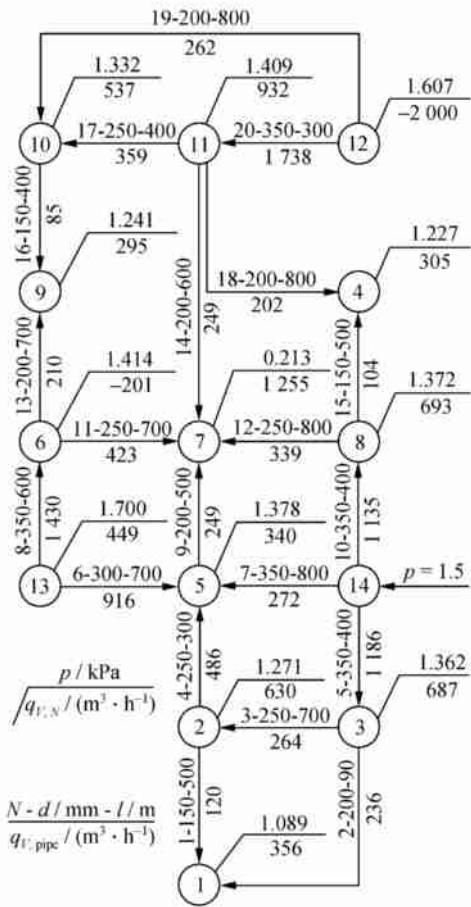


图 3 连接矩阵改造算法



节点 13 为给定压力气源,节点 14 为基准气源节点,节点 12 为给定流量的气源,其余各节点为供应节点

图 4 简单燃气管网示例

图 5a 为管网正常工况下压力分布情况 (假设除节点 7 以外的所有用户需求压力均为相对压力 1.0 kPa,并在图中以黑色实线标出)。图 5b 和图 5c 是节点 2 破裂泄漏和管段 4 破裂泄漏 (破裂口与节点 2 相距 250m) 情况下的压力分布模拟计算的结果

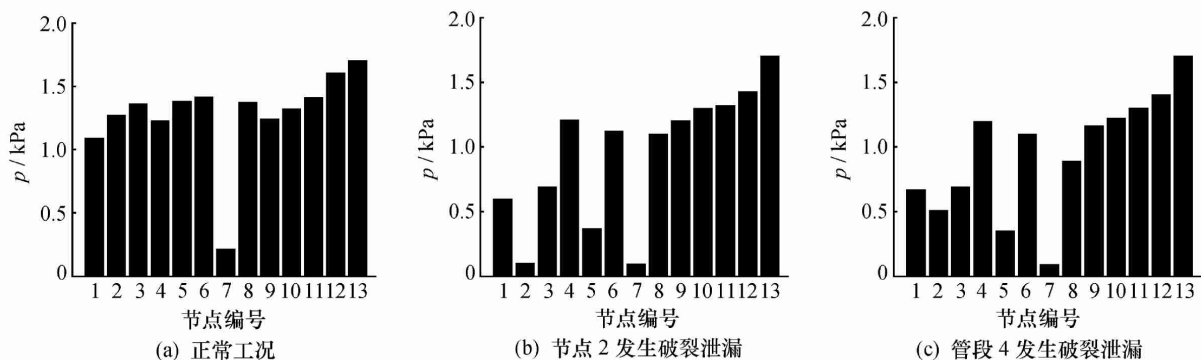


图5 正常及泄漏工况下管网各节点压力分布

由图 5b 可见,节点 2 破裂,使得 1 2 3 5 不能正常供应燃气,其中对节点 2 影响最为严重,压力下降约 92%。由图 5c 可以发现,管段 4 破裂使节点 1 2 3 5 8 不能正常供应燃气,对节点 5 燃气供应影响最为严重,压力下降约 75%。这些节点代表的实际上是一个区域,通过分析区域中的人口密度、工业企业以及事业机关单位的布局 and 结构,就可以就该事故的发生做出科学合理的风险评估与预测。

### 3 结 论

本文的工作改变了以往将管网水力计算原理的应用仅局限于管网设计与优化的做法,而把管段及节点计算流量模型、燃气泄漏子模型以及管网压力分布计算子模型有机地结合起来,建立了燃气管网故障传播模型,并尝试把该模型应用于燃气管网的故障影响区域的预测中。

当把燃气用户以小区为单位进行划分,把小区当作供应节点来研究时,本模型能有效模拟城市燃气管网在发生节点和管段破裂情况下燃气管网的压力分布,并根据用户的需求压力,分析各区域燃气供应受到的影响。本文建立的模型对城市的燃气管网故障影响区域预测、城市燃气规划和建筑规划具有一定的参考价值。

### 参考文献 (References)

- [1] 姚奕颖. 城市天然气管网的拓扑优化 [J]. 煤气与热力, 2004, 10(10): 542 - 546.  
YAO Yiyang. Topological optimization of city natural gas network [J]. *Gas & Heat*, 2004, 10(10): 542 - 546. (in Chinese)
- [2] Sung W, Huh D, Lee J, et al. Optimization of pipeline networks with a hybrid MCST-CD networking model [J]. *SPE Production & Facilities*, 1998, 13(3): 213 - 219.
- [3] 王同华, 王磊, 张春波, 等. 燃气管网设计中的模拟与优化进展 [J]. 城市燃气, 2005, 363(5): 3 - 7.

- WANG Tonghua, WANG Lei, ZHANG Chunbo, et al. The progress of simulation and optimization research of gas pipeline design [J]. *Urban Gas*, 2005, 363(5): 3 - 7. (in Chinese)
- [4] Montiel H, Vilchez J A, Casal J, et al. Mathematical modeling of accidental gas releases [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, 59: 211 - 233.
- [5] 颜力, 李长俊, 廖柯熹. 输气管道泄漏影响的危害性分析 [J]. 内蒙古石油化工, 2005(9): 28 - 30.  
YAN Li, LI Changjun, LIAO Kexi. The analysis of fatality for city windpipe leaking [J]. *Inner Mongolian Petrochemical Industry*, 2005(9): 28 - 30. (in Chinese)
- [6] 黄小美. 城市燃气管道系统风险评价研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.  
HUANG Xiaomei. Research of risk assessment on pipelines system for urban gas [D]. Chongqing Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [7] Martinez J L, Alcerrecas H G, Rodriguez E B, et al. Risk assessment of gas transmission pipelines in Mexico [C] // Proceedings of the International Pipeline Conference, IPC. NJ ASME, 1998: 29 - 36.
- [8] 刘雯. 天然气管道运行的可靠性评价技术 [J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 94 - 97.  
LIU Wen. Technique of evaluating the reliability of natural gas pipeline operation [J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(4): 94 - 97. (in Chinese)
- [9] Shimizu Y, Yamazaki F, Yasuda S, et al. Development of real-time safety control system for urban gas supply network [J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2006, 132(2): 237 - 249.
- [10] 马良涛. 燃气输配 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
MA Liangtao. Gas Transmission [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 彭世尼. 燃气安全技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005.  
PENG Shini. Gas Safety Technology [M]. Chongqing Chongqing University Press, 2005. (in Chinese)
- [12] 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 Changming. Design Basis of Gas Network Hydraulic Calculation Procedure [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1997. (in Chinese)