

# 燃气管道三色泄漏定位及风险评估<sup>\*</sup>

张甫仁<sup>1,2</sup> 张辉<sup>1</sup> 徐湃<sup>1</sup>

1.重庆交通大学机电与汽车工程学院 2.重庆大学城市建设与环境工程学院

张甫仁等.燃气管道三色泄漏定位及风险评估.天然气工业,2009,29(8):101-105.

**摘 要** 预防和控制燃气泄漏事故的发生以及合理评价燃气事故的风险,是燃气输运安全领域研究的重点课题,其关键技术在于燃气泄漏位置的确定。为了更加科学合理地燃气事故进行预防、控制和评价,提出了基于首末端监控的双向同步仿真与实地监测相结合的时差最小化的三色泄漏定位方法和基于 GIS 的城市燃气管网区域风险评价方法,并针对其实现关键技术进行了探讨和分析;以增加耗散项和初始点、延长出口点的方法,简化了动态仿真模型求解过程,增加了结果的稳定性;建立了变孔径泄漏及扩散综合计算模型,运用格林函数得出了其相应经验解析公式,弥补了非正常泄漏研究及其扩散技术模型无法对泄漏扩散浓度做出合理可靠分析的不足;对燃气浓度极限和冲击波致人伤亡的危险性给予了分析。

**关键词** 燃气管道 泄漏 预警 GIS 定位 区域 风险评价

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.08.031

城市燃气管网是一个分布在人口和建筑集中区域的复杂系统,其安全运行受到许多因素的影响,一旦发生燃气泄漏、火灾爆炸事故,将会造成严重的人员伤亡和财产损失<sup>[1-3]</sup>。预防和控制燃气泄漏事故的发生,合理评价燃气事故的风险,成为燃气输运安全领域研究的重点之一。泄漏位置的确定<sup>[4-7]</sup>是预防和控制燃气泄漏事故、评定燃气泄漏事故后果的基础,也是目前燃气输运安全领域研究的重点,但在实际应用过程中,还存在较多的问题。风险评价在燃气输运领域才开始初步的研究,且目前主要采用的是将单纯事故发生所造成的后果与事故概率相结合的方法来进行分析。为了能够更科学合理地燃气事故进行预防、控制和评价,对围绕燃气管网泄漏定位、动态泄漏的泄漏率及泄漏量的分析计算、泄漏燃气的扩散规律及事故的伤害和破坏范围、三维 GIS 管网绘制、区域风险评价等进行了初步的探讨,并对其关键技术进行了研究。

## 1 三色泄漏报警及定位关键技术

### 1.1 泄漏报警及误报排除

为了降低监控成本,提高报警的精确度,排除误

报警的可能性,采用首末端监控的同步双向仿真双对比的三色泄漏报警及定位法来进行研究。

#### 1.1.1 黄色泄漏报警

当燃气泄漏事故发生时,为了安全、快速、便捷地进行抢修和救灾,将事故的危害性降到最低,就必须快速准确地燃气泄漏事故发生时给予预警。当管道发生泄漏时,泄漏点处由于管道内外的压差,流体迅速流失,压力下降,泄漏点两边的流体由于存在压差而向泄漏点处补充,这一过程依次向上下游传递。因此,当泄漏发生时相关信息传输到监测点,测得的压力、流量参数将与同一时刻用仿真方法所得压力和流量参数存在较大的误差。为了能够在最短时间内发现泄漏,将利用智能数据采集模块和数传电台同时对管线两端的数据进行实时采集,对比前后两时刻首末端压力参数,如果差值较大,则此时发出黄色泄漏报警。

#### 1.1.2 橙色泄漏报警及误报排除

为确保报警精度及排除误报警,此时分别利用该时刻首端和末端参数分别为初始条件对管网进行首末端仿真,分别得到管线的压力分布曲线 2 和曲线 3。仿真压力分布及定位如图 1 所示(曲线 1 为管

<sup>\*</sup> 本文受到国家自然科学基金项目(编号:50704041)、重庆市自然科学基金(编号:CSTC,2008BB6347)、中国博士后科学基金(编号:20080430752)和重庆交通大学博士科研基金启动项目的资助。

**作者简介:**张甫仁,1975年生,副教授,工学博士;主要从事燃气输配、室内环境与建筑节能等方面的研究工作。地址:(400074)重庆市交通大学机电与汽车工程学院。电话:15922648960。E-mail:zh\_feixue@163.com

道首端为固定输入气源情况下,泄漏前一时间仿真压力分布曲线;曲线为管道首端为非固定输入气源情况下,泄漏前一时间仿真压力分布曲线)。如果此时曲线2和曲线3首末端的压力相对误差均较大,且不在仿真允许误差范围内,则此时可发出橙色泄漏报警。反之,如果误差较小,在允许的误差范围内,则可认为此时压力变化是由于管道输送流量或者用户使用量发生变化造成的,此时则可解除泄漏报警。

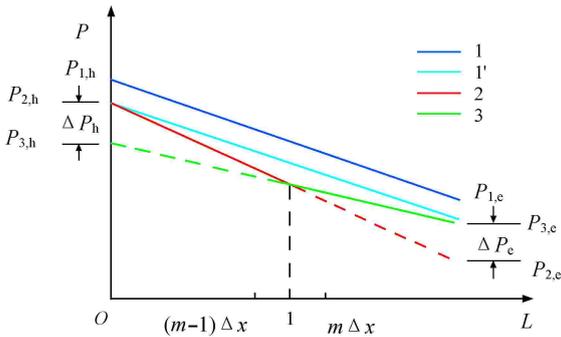


图1 双向同步仿真压力分布及泄漏定位示意图

### 1.1.3 红色泄漏报警及误报排除

为了进一步提高报警的精确性,排除误报警的可能性,此时必须调用下一时刻参数,分别进行首末端仿真,如果此时仿真压力分布曲线2和曲线3的首末端压力值相对误差均较小,且在仿真允许误差范围之内,同时,两条曲线2和曲线3之间相对误差也较大,此时,则可以发出泄漏红色报警,即确定泄漏事故发生。反之,则取消泄漏报警。

## 1.2 泄漏报警时差最小化方法

### 1.2.1 泄漏预警基础时间确定

为了缩短泄漏事故的报警时间,提高报警精度,采用双向同步系统仿真的方法。此时能确定泄漏发生的最短时间为  $\min(\tau, \tau, \tau)$ <sup>[4]</sup>,其中: $\tau$ 为泄漏所造成的扰动传播到管道首端所需时间; $\tau$ 为泄漏所造成的扰动传播到管道终端所需时间; $\tau$ 为泄漏所造成的扰动熵变过程传播到管道终端所需时间。

### 1.2.2 监控及仿真时间间隔的确定

一般说来,泄漏监控及仿真数据时间间隔越小越好,但是根据2.1中黄色报警最小时间理论来看,在实际运行中时间间隔需要考虑采集系统的设置,同时仿真软件在针对管网进行仿真时也是需要一定时间的。如果针对全程监控管道而言,则 $\Delta\tau$ 可以取一个较小的值,以实现理论时间报警。

### 1.2.3 泄漏预警时差最小化时间

根据上述分析可知,文献[4]、[5]所得到的时间不可能是实际运行中得到发出最终警报的最短时间,在实际情况下,当泄漏事故发生时,真正的最短报警时间应该是发出黄色预警时间( $\tau_y$ )、橙色预警时间( $\tau_o$ )和红色预警时间( $\tau_r$ )之和,即:

$$\tau = \tau_y + \tau_o + 2\tau_r + 2\tau \quad (1)$$

$\tau_y$ 的确定就成为泄漏定位时间的关键,而 $\tau_y$ 为:

$$\tau_y \subset [\min(\tau, \tau, \tau), \min(\tau, \tau, \tau) + \Delta\tau] \quad (2)$$

目前针对监控点实施实时数据采集监控已是一件非常容易的事情,故此, $\Delta\tau$ 值采用一个较小的时间。此时, $\tau_y$ 可用泄漏信息传播所需时间  $\min(\tau, \tau, \tau)$ 来近似表示。故此,泄漏最小化时间可简化为:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y + \tau_o + 2\tau_r = \\ &\tau_y + 2\tau = \\ &\min(\tau, \tau, \tau) + 2\tau \end{aligned} \quad (3)$$

## 1.3 泄漏定位

仿真压力分布曲线2和曲线3交叉点所在的离散点所代表区域即为泄漏点所在区域。其具体泄漏位置的确定,则可根据管网网格化点进行分析计算得到。

## 1.4 仿真模型求解方法的改进

由于泄漏报警需要采用系统仿真来进行,因此管网仿真模型及求解方法也需要给予考虑和分析。针对管网动态非等温仿真模型已进行了一定的研究,但其在工程实际方面的应用国内还鲜有报道。动态非等温数学模型可以表示为<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + H = 0 \quad (4)$$

但目前的模型求解方法给予了较多的简化,求解结果可靠性大大降低,同时其求解结果方法也相对较为烦琐<sup>[1]</sup>。在此,将针对动态非等温仿真模型的求解方法给予改进。

令: 
$$E = AU \quad (5)$$

则  $A = \frac{\partial E}{\partial U}$  是  $E$  的 Jacobian 矩阵。

根据 Crank-Nicolson 格式,并通过在方程的右端添加四阶耗散项和耗散格式修正项以避免定常数值解中出现奇偶失联波动并增强格式稳定性。同时,为了保证模型求解过程的稳定性,在公式左端添加二阶耗散项来实现。同时,根据文献[8]的简化条件和方法,将采用延长初始时刻和延长出口点数的方法以简化的求解。

## 2 风险评估关键技术

燃气管网区域风险评价将从泄漏率和泄漏量、泄漏动态扩散、火灾爆炸事故危险性、事故概率、事故区域风险等方面入手进行分析。

### 2.1 变孔径泄漏综合计算模型

当燃气输运管道发生大孔径泄漏时,由于气源的存在,在一定时间内,可认为泄漏维持一种定常泄漏状态。而当气源被自动或人为切断后,泄漏将会呈现出一种泄漏率逐渐降低,直到停止的过程。目前泄漏扩散的研究,还无法对上述泄漏情况的扩散浓度做出合理可靠的分析。为此,将针对燃气动态泄漏扩散模型结合稳态扩散模型来进行分析。

根据质量守恒方程可以得到此时非稳态泄漏率的表达式<sup>[3]</sup>:

$$Q_m(t) = -V_p \frac{d\rho(t)}{dt} \quad (6)$$

据临界压力判别标准,并结合临界流、亚临界流变孔径孔口泄漏下任意时刻的  $P$ 、 $T$ 、 $\rho$ 、 $Q_m$ 、 $m$  的计算关系式<sup>[1]</sup>,运用格林函数可得出其温度和压力经验解析公式如下:

$$\frac{dT}{dt} = - \left[ \frac{T}{T_{0,\text{sub}}} - \left( \frac{P_a}{P_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]^{1/2} \frac{(\gamma-1)Q_{m0,\text{sub}}}{m_{0,\text{sub}}} \times \left( \frac{T}{T_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{(\gamma-2)}{(\gamma-1)}} \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]^{-1/2} \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{\gamma}{\gamma-1} P_{0,\text{sub}}^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \frac{(\gamma-1)Q_{m0,\text{sub}}}{m_{0,\text{sub}}} P^{1/\gamma} \left( \frac{P}{P_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{(\gamma-2)}{\gamma}} \times \frac{1}{T_{0,\text{sub}}} \left[ \left( \frac{P}{P_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \left( \frac{P_a}{P_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]^{1/2} \times \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_{0,\text{sub}}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]^{-1/2} \quad (8)$$

通过进一步分析计算,确立变孔径泄漏模型(小孔、大孔及管道模型)的适用相对孔径范围,并确定出各影响因素对泄漏率和泄漏量的影响。

### 2.2 动态泄漏扩散研究

根据动态泄漏率不定常的特点,以气体动力学理论和湍流扩散微分方程为基础,结合相应的初始条件和边界条件,利用格林函数进行推导,可得综合扩散模型格林函数为:

$$G(x, y, z, t; x', y', z', t') = G(x, t, x', t') G(y, t, y', t') G(z, t, z', t') = \frac{1}{[8\pi^3 (t-t')^3 K_x K_y K_z]^{1/2}} \times \exp \left\{ \frac{-[x-x'-u(t-t')]^2}{4K_x(t-t')} \right\} \times$$

$$\exp \left\{ \frac{-[y-y'-v(t-t')]^2}{4K_y(t-t')} \right\} \times \left\{ \exp \left[ \frac{-[z-z'-w(t-t')-H]^2}{4K_z(t-t')} \right] + \exp \left[ \frac{-[z-z'-w(t-t')+H]^2}{4K_z(t-t')} \right] \right\} dt' \quad (9)$$

则该模型的浓度积分表达式为:

$$c(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{Q(t-t')}{[8\pi^3 (t-t')^3 K_x K_y K_z]^{1/2}} \times \exp \left\{ \frac{-[x-u(t-t')]^2}{4K_x(t-t')} \right\} \exp \left\{ \frac{-[y-v(t-t')]^2}{4K_y(t-t')} \right\} \times \left\{ \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t')-H]^2}{4K_x(t-t')} \right] + \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t')+H]^2}{4K_x(t-t')} \right] \right\} dt' = \int_0^t \frac{Q(t-t')}{(2\pi)^{3/2} \alpha \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ \frac{-[x-u(t-t')]^2}{2\alpha^2} \right\} \times \exp \left\{ \frac{-[y-v(t-t')]^2}{2\sigma_y^2} \right\} \times \left\{ \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t')-H]^2}{2\alpha^2} \right] + \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t')+H]^2}{2\alpha^2} \right] \right\} dt' \quad (10)$$

$t' \neq t$  当时,即泄漏源不是连续源也非瞬时源时,此时,上式中的  $Q(t-t')$  应取泄漏源  $Q(t')$ ,则非连续源非稳态泄漏扩散模型计算式应修正为:

$$c(x, y, z, t, t') = \int_0^t \frac{Q(t')}{(2\pi)^{3/2} \alpha \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ \frac{-[x-u(t-t')]^2}{2\alpha^2} \right\} \exp \left\{ \frac{-[y-v(t-t')]^2}{2\sigma_y^2} \right\} \times \left\{ \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t')-H]^2}{2\alpha^2} \right] + \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t')+H]^2}{2\alpha^2} \right] \right\} dt' \quad (11)$$

当泄漏率( $Q$ )是时间的规则函数时,可以直接利用上式进行计算。但当阀门关闭时,管道泄漏为非稳态泄漏,此时的  $Q$  不是时间的规则函数,为避免积分过程中的不可积性,此时以分段求和法(分段积分法)来进行求解。令:

$$C_m(t, t_j) = \frac{Q(t_j)}{(2\pi)^{3/2} \alpha \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ \frac{-[x-u(t-t_j)]^2}{2\alpha^2} \right\} \exp \left\{ \frac{-[y-v(t-t_j)]^2}{2\sigma_y^2} \right\} \times \left\{ \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t_j)-H]^2}{2\alpha^2} \right] + \exp \left[ \frac{-[z-w(t-t_j)+H]^2}{2\alpha^2} \right] \right\} dt' \quad (12)$$

令  $t_1=0, t_N=t'$ , 当时间较短时,取  $N=1\ 000$  足

可以满足工程计算精度需求。则对任意时刻任意点处的浓度计算式为:

$$c(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^N \{ [C_m(t, t'_{j+1}) - C_m(t_j, t'_j)] (t'_{j+1} - t'_j) \} \quad (13)$$

当泄漏为地面点源泄漏时,则令上述各式中的  $H=0$ , 所得各式就为地面源泄漏模型。

式(6)~(13)中相关参数及意义详见文献[1]。

### 2.3 泄漏危险性分析

1)以一给定时间内燃气致伤亡浓度来分析研究泄漏气体扩散的单纯危险性,即此时的伤亡范围值。

2)泄漏火灾爆炸事故的危险性主要可从两个方面来分析:一是发生火灾爆炸事故的可能性;二是发生事故后所造成的破坏危险范围。其分析手段通过以泄漏扩散中心点为燃爆点,以热致伤和超压一冲量综合准则来研究冲击波致伤,分析研究扩散气体燃烧爆炸所造成的危险性;分析各影响因素对泄漏危险性的影响。

### 2.4 区域风险评价关键技术研究

城市燃气风险是指由各种原因引起的对人类社  
会及自然环境产生破坏、损害及至毁灭性作用的城  
市燃气事故发生的概率及其后果。区域风险评  
价<sup>[9-10]</sup>主要是针对区域内的危险源在区域内某一固  
定位置致使人员的个体死亡概率进行研究。根据风  
险的定义可知,风险是造成损失的可能性大小,因  
此,它不可能是一个确切的值,应当是一个模糊的界  
于一个区间变化的值。而在现有研究<sup>[7-9]</sup>中,均将其  
视为一个确切的数值,在一定程度上说,是不准确  
的。另外,在现有风险评价中忽略了许多影响事故  
风险的相关因素。因此,下面,将围绕城市燃气区  
域风险评价的关键技术给予基础分析。

#### 2.4.1 燃气区域风险评价综合模型

据上述分析,当事故发生时,事故所造成的危险  
性不仅与事故本身的危险性有关,还与救灾系统与  
预警系统的完善度、抗灾能力的大小等降灾因素有  
着密切的关系,同时还与空间位置有着相当的关系。  
但由于三维空间风险需要考虑的因素很多,同时其  
结果也需要利用三维图形来显示,这给在现阶段采  
用软件来表示结果带来了相当的困难,并且,其结果  
也无法在二维地图上显示出来。因此,将忽略空间  
方向上的影响,提出如下二维空间个体风险综合评  
价模型:

$$R_{p,s,d}(x, y) = f_s v_{s,d} e_{s,d} (1 - h) \quad (14)$$

式中: $R_{p,s,d}(x, y)$ 为燃气事故在空间位置  $(x, y)$  处所

产生的第  $s$  个情景事故,即泄漏、火灾和爆炸事故所  
造成的第  $d$  类伤害(死亡、重伤和轻伤)个体危险性;  
 $f_s$  为第  $s$  个情景事故发生的模糊概率值; $v_{s,d}$  为第  
 $s$  个情景事故发生时在  $(x, y)$  所产生的第  $d$  类事故的  
可能性,即概率值; $e_{s,d}$  为第  $s$  个情景故事发生时的环  
境因素对事故的影响因子; $h$  为考虑救灾等因素在  
内的降灾因子。

区域风险评价不仅关心事故发生时的个体风险,  
更关心社会风险的大小。而社会风险与个体风险存  
在较大的差异。以下将针对社会风险给予分析。

$$R_{N,s,d}(x, y) = R_{m,s,d}(x, y) \rho = f_s v_{s,d} e_{s,d} (1 - h) \rho \quad (15)$$

式中: $R_{N,s,d}(x, y)$ 为燃气事故在空间位置  $(x, y)$  处所  
产生的第  $s$  个情景事故即泄漏、火灾和爆炸事故所  
造成的第  $d$  类伤害(死亡、重伤和轻伤)社会风险; $\rho$   
为区域内空间位置  $(x, y)$  处人口密度值。

$f_s$  的计算方法,可根据文献[1]、[10]相关资料,  
借助文献[11]的方法来进行确定和计算。 $v_{s,d}$  的计  
算,可采用如下关系式来计算:

$$v_{s,d} = \int_0^T L_c dt \quad (16)$$

式中: $L_c$  为燃气浓度、冲击波、当量热辐射值为  $c$  时,  
单位时间内对人体的伤害概率值。

#### 2.4.2 基于 GIS 的区域风险表达

区域风险评价的关键还是首先要确定出二维地  
理空间上各点的风险值。然而,地理空间相对来说  
较大,故此需要采用网格化二维地理空间,以方便风  
险分析和求解。网格化过细,精度高,但却相当烦  
琐,且在实际应用中的效果也不好,反之,如果太过  
粗略,计算精度却又无法达到应用的要求。故此,需  
根据地理空间和实际应用的具体情况来进行合适精  
度的网格划分。

个体和社会区域风险的表达方法,将分别采用  
各网格点的风险值所处等级,进行各等风险点联汇,  
并利用相关等级颜色在 GIS 所表达的地图上进行等  
级色彩渲染。

## 3 结论

1)为了提高报警的精确度,排除误报警的可能  
性,提出了基于首末端监控的双向同步仿真与实地  
监测相结合的时差最小化的三色泄漏定位方法,并  
针对其实现关键技术做了探讨和分析。

2)对多参数动态非定常泄漏、扩散综合计算数  
学模型及相关难点进行了研究,解决了目前在非定

常泄漏及扩散技术模型存在的不足。同时,对燃气浓度极限和冲击波致人伤亡的危险性给予了分析,为获得高精度泄漏危险性和对已发事故的分析 and 再现提供了参考。

3)提出了基于 GIS 并综合考虑救灾系统与预警系统的完善度、抗灾能力的大小等降灾因素的城市燃气管网区域风险评价。

#### 参 考 文 献

- [1] 张甫仁.燃气管网系统安全性及仿真的理论分析与应用研究[D].天津:天津大学,2005.
- [2] 张甫仁.燃气管线动态泄漏扩散的危险性分析[J].重庆建筑大学学报,2007,29(2):103-109.
- [3] HELENA MONTIEL, JUAN A V, JOAQUIM CASAL, et al. Mathematical modeling of accidental gas release[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 59: 211-233.
- [4] 刘恩斌,彭善碧,李长俊,等.基于瞬态模型的油气管道泄漏检测[J].天然气工业,2005,25(6):102-104.
- [5] 张红兵,李长俊,彭善碧.输气管道故障诊断中的实时模型法[J].天然气工业,2005,25(10):103-105.
- [6] 冯健,张化光.管道泄漏计算机在线检测系统及其算法实现[J].控制与决策,2004,19(4):377-382.
- [7] 蔡正敏,彭飞,易发新,等.长输管道泄漏故障诊断方法的研究[J].应用力学学报,2002,19(2):38-43.
- [8] 张涵信,沈孟育.计算流体力学——差分方法的原理和应用[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [9] 刘桂友,徐琳瑜.一种区域环境风险评价方法——信息扩散法[J].环境科学学报,2007,27(9):1549-1556.
- [10] 吴宗之,多英全,魏利军,等.区域定量风险评价方法及其在城市重大危险源安全规划中的应用[J].中国工程科学,2006,8(4):46-49.
- [11] 陈国华,张静,张晖,等.区域风险评价方法研究[J].中国安全科学学报,2006,16(6):112-117.

(修改回稿时间 2009-05-15 编辑 何 明)