

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.05.008

引用格式:徐刚,余阳阳,郑山锁,等.城市埋地供气管网系统抗震功能可靠性分析[J].重庆大学学报,2026,49(5):107-117.



城市埋地供气管网系统抗震功能可靠性分析

徐刚^{1,2a},余阳阳^{1,2a},郑山锁^{2b},程思渊^{1,2a},史继宁^{1,2a},刘俊杰^{2b}

(1. 中国能源建设集团陕西省电力设计院有限公司,西安 710054; 2. 西安建筑科技大学 a. 土木工程学院;
b. 结构工程与抗震教育部重点实验室,西安 710055)

摘要:供气系统一般不允许带泄漏运行,对震后发生泄漏规模大的管网应立即停止供气,并及时排查修复,但当地震等级偏低,或发生管线破坏程度较轻时,考虑到城市居民用气需求,并不会全面停止供气。因此,在这种状况下供气管网并非无泄漏工作状态,而是处于轻微带泄漏工作状态。为评估带泄漏供气管网系统抗震功能可靠性,将管道震后不同破坏状态与埋地燃气管道泄漏模型结合起来,建立了考虑燃气管道泄漏的供气管网震后水力分析模型。利用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法耦合管道的三态破坏概率随机生成震后管道破坏状态,基于“压力驱动型”的水力计算方法进行了供气管网在设定地震下的功能可靠性计算,提出了震后用户节点服务状态量化标准。基于此分析方法对某低压供气管网进行了 1 000 次 Monte Carlo 模拟,不同地震状况下管网的功能可靠性分析,结果表明,该供气管网在 VI 度、VII 度地震下系统抗震功能可靠性较高,在 VIII 度地震下系统抗震功能可靠性大幅度降低,研究成果可为供气管网抗震功能可靠性分析及修复提供科学依据。

关键词:功能可靠性;泄漏;水力分析;Monte Carlo

中图分类号:TU990.3

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)05-107-11

Reliability analysis of the seismic performance of urban gas supply pipeline networks

XU Gang^{1,2a}, SHE Yangyang^{1,2a}, ZHENG Shansuo^{2b}, CHENG Siyuan^{1,2a}, SHI Jining^{1,2a}, LIU Junjie^{2b}

(1. Shannxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, P. R. China; 2a. School of Civil Engineering;
2b. Key Laboratory of Structural Engineering Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Gas supply systems are generally not allowed to operate under leakage conditions; pipeline networks with extensive leakage after earthquakes must be shut down immediately for inspection and repair. However, under low seismic intensity or minor pipeline damage, complete shutdown is often impractical due to urban gas

收稿日期:2025-07-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509302);国家自然科学基金资助项目(52278530);陕西省重点研发计划资助项目(2021ZDLSF06-10)。

Supported by National Key Research and Development Program Project (2019YFC1509302), National Natural Science Foundation of China (52278530), and Shaanxi Province Key Research and Development Program Project (2021ZDLSF06-10).

作者简介:徐刚(1988—),男,工程师,主要从事工程结构抗震研究,(E-mail)303597686@qq.com。

通信作者:郑山锁,男,教授,博士生导师,(E-mail)zhengshansuo@263.net。

demand, and the system may operate under slight leakage conditions. To evaluate the reliability of gas supply networks under such conditions, this study integrates post-earthquake pipeline failure states with a leakage model for buried gas pipelines and establishes a hydraulic analysis model that accounts for leakage. A three-state failure probability model is coupled with Monte Carlo method to randomly generate post-earthquake pipeline failure states. The functional reliability of the gas supply network under specified seismic conditions is then evaluated using a “pressure-driven” hydraulic analysis method, and the service status of user nodes after the earthquake is quantified. Based on this framework, the functional reliability of a low-pressure gas supply network under different seismic intensities is analyzed through 1 000 Monte Carlo simulations. The case study results show that the system maintains high seismic reliability under VI and VII earthquakes, while reliability decreases significantly under VIII earthquakes. These findings provide a scientific basis for post-earthquake reliability assessment and repair planning of urban gas supply pipeline networks.

Keywords: gas supply; serviceability; leakage; hydraulic analysis; Monte Carlo method

供气管网系统作为重要的城市基础性设施系统,与人们日常生活紧密相关。我国地震断裂带十分活跃,若供气管网系统受到地震作用后发生破坏,居民对燃气的需求将无法保障,因此,对供气管网抗震可靠性进行评估,显得尤为重要。可靠性即指产品在规定时期和规定条件范围内,实现规定功效的能力^[1]。供气管网的抗震可靠性^[2-3]主要可分为抗震连通可靠性和抗震功能可靠性。管网抗震连通可靠性着重从结构机械角度对管网系统及其组成单元进行分析,侧重考查管网系统在地震状况下具有结构完整性的概率^[4],并未考虑水力工况的影响,不能反映震后某一燃气用户需气量的满足程度。管网抗震功能可靠性是在考虑震后结构失效概率的基础上,通过管网的水力计算,得到管网中各节点压力及流量,用节点流量进行管网可靠性的综合评价标准。Liu等^[5]基于概率密度演化法提出了供气管网的抗震连通可靠性评价方法,并通过 Monte Carlo 法验证结果。Cavalieri^[6]采用基于连通性和基于流量的性能指标,在未损坏或已损坏情况下,对供气管网系统抗震可靠性进行了评估。目前,关于供气管网抗震功能可靠性分析较少,主要集中于管网在某一事故工况下的功能可靠性。焦文玲等^[7]建立了燃气事故工况下管网水力计算模型,基于“压力驱动型”水力计算方法进行管网的功能可靠性计算,但只针对指定管道的破坏,未对管道破坏的随机性及管道泄漏状态进行研究。范慕炜等^[8]基于故障率分布蒙特卡洛进行模拟,将燃气管道随机状态分为正常和故障2种状态,生成了天然气管网的拓扑结构,再通过水力计算得到管网功能可靠性,但未考虑到管道的泄漏状况。当发生破坏性地震后,为防止燃气泄漏引起火灾、爆炸等次生灾害,应完全关闭管网,再进行检测修复工作。但当地震等级较小或管网破坏程度较轻时,为保证居民用气需求,有时也会选择带泄漏运行管网。王祥建等^[9-10]分析了汶川地震后取得的21个县市燃气管网震害资料,结果表明,有10个县市由于震害较轻,并未完全关闭管网,而是选择了继续供气或间歇供气,燃气管网运行时处于轻微带泄漏工作状态。由此可见,地震后燃气管网带泄漏工作情况较常见,对其功能可靠性进行分析十分重要。目前,将城市燃气管网地震状况下管道的随机破坏与水力计算结合起来,进行供气管网抗震功能可靠性分析的研究相对较少,由于燃气管网多为埋地管道,震后处于轻微带泄漏工作状态,传统事故状况下的供气管网水力分析模型,已不再适用。

文中结合供气管网水力分析相关理论并借鉴供水管网抗震功能可靠性分析方法^[11],提出了一套供气管网抗震功能可靠性分析方法,基于管道三态破坏概率采用 Monte Carlo 方法对震后供气管网进行随机破坏模拟,建立了考虑燃气泄漏的震后管网水力分析模型。首先,基于小孔模型对水力分析模型中泄漏管道进行了燃气管道泄漏流量计算,再通过“压力驱动模型”水力计算方法进行震后水力分析,最后计算供气管网抗震功能可靠度,提出了震后用户节点服务状态量化标准,并编制了燃气管网震后功能可靠性分析程序,为供气管网抗震功能可靠性评估提供依据。

1 震后水力分析模型

1.1 埋地燃气管道泄漏模型

震后供气管道将发生不同程度的破坏,中国地震局工程力学研究所将供气管道的地震破坏状态分为3类:基本完好、中等破坏和严重破坏^[12]。对于严重破坏的管道,发生大规模泄漏后,极易引起火灾、爆炸等次生灾害;对于中等破坏的管道,产生轻微泄漏,也容易引起一些次生灾害。由于供气管道的特殊性,一般不允许带泄漏工作,对发生泄漏的管道应停止供气并隔离修复,对于泄漏量较大的管道,震后第一时间被发现会采取关阀措施,而对于泄漏量很小的管道,城市燃气管道大都埋置于地下,很难及时发现并进行隔离修复,因此,震后城市燃气管网一般处于轻微带泄漏工作状态。

对供气管网进行功能可靠性分析需选取合适的渗漏模型以模拟真实情况。对于燃气泄漏模型,国内学者进行了大量研究,燃气泄漏模型大致可分为两类^[13]:小孔模型和管道断裂模型,分别适用于管道发生轻微泄漏及管道断裂2种情况,管道断裂模型对应于震后发生严重破坏的管道,震后会被第一时间采取关阀措施,以保证燃气不会发生泄漏或者燃气爆炸现象^[14];小孔泄漏模型对应于发生轻微泄漏的管道,由于泄漏量较小且深埋地下而不易被察觉,无法及时采取措施,因此,需要对这种情况进行燃气管道泄漏流量进行计算,小孔模型的示意图如图1所示。

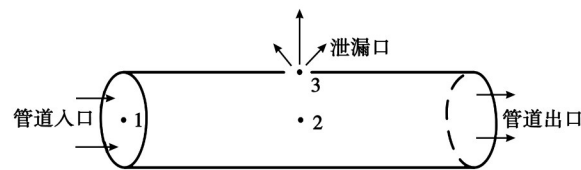


图1 小孔泄漏模型

Fig. 1 Small hole leakage model

由于燃气管道多为埋地管道,而小孔模型是基于燃气从管道直接泄漏至大气的情形,埋地管道泄漏受到土壤黏滞阻力影响,实际泄漏量会比采用小孔模型计算的泄漏量更小。韩光洁^[15]通过试验对不同管径燃气管道埋地泄漏量与管道非埋地泄漏量进行了测量,发现2种比值为75%~85%。因此,计算埋地燃气管道泄漏量时,应对小孔模型泄漏流量计算结果乘以0.75~0.85的折减系数,才更符合实际。

管道发生泄漏时,根据燃气在泄漏口的流速可分为亚音速与音速2种情况,管道的泄漏质量流量分别按式(1)和(2)计算。

当 $\frac{p_a}{p_2} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时,燃气泄漏速度为亚声速,则有:

$$q_m = \alpha c_g A_L \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\frac{p_a}{p_2}\right)^{\frac{2k}{k-1}} - \left(\frac{p_a}{p_2}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (1)$$

当 $\frac{p_a}{p_2} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时,燃气泄漏速度为声速,则有:

$$q_m = \alpha c_g A_L \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+2}\right)^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (2)$$

式中: p_a 为大气压,kPa; q_m 为泄漏质量流量,kg/s; α 为土壤黏滞力修正系数,一般可取0.75~0.85; c_g 为孔口流量系数,圆形孔口取1; p_2 为图1中2点燃气的绝对压力,由于泄漏孔径较小,可忽略管道延迟阻力,取 $p_2=p_1$; R 为燃气的气体常数,J/(kg·K),对于天然气,可取 $R=518$; T_2 为图1中2点的燃气温度; k 为燃气等熵指数,天然气取1.29。

通常需将燃气泄漏质量流量转为泄漏体积流量,表达式为

$$q_v = 3600 \frac{q_m}{\rho_0}, \quad (3)$$

式中: q_v 为燃气泄漏质量流量, m^3/h ; ρ_0 为燃气密度, kg/m^3 ,天然气取 $\rho_0=0.7174$ 。

1.2 震后埋地管道破坏概率及泄漏面积计算

埋地管道震害服从泊松分布且随机独立发生,管道三态破坏概率按式(4)进行计算^[16]:

$$\begin{cases} P_{\text{I}} = 1 - P_{\text{I2}} - P_{\text{I3}}, \\ P_{\text{I2}} = 1 - e^{-0.85 \cdot R_f \cdot L}, \\ P_{\text{I3}} = 1 - e^{-0.15 \cdot R_f \cdot L}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{I} 、 P_{I2} 、 P_{I3} 分别为埋地管道处于基本完好、中等破坏、严重破坏状态的概率; R_f 为管道震害率; L 为破坏管道长度。

在震害预测中通常采用考虑多种因素的修正震害率^[17],将式(4)中 R_f 用 R'_f 表示,地震波作用修正震害率表达式为

$$R'_f = C_g C_p C_d R_f, \quad (5)$$

式中: C_g 为场地分类系数,对硬、中、软场地分别取0.4、0.9、2.0; C_d 为管道埋深影响系数,如表1所示; C_p 为管材影响系数,铸铁管取1.0,焊接钢管取0.1,当缺少震害资料时,地震烈度为VI、VII、VIII、IX度时, R_f 分别取0.01、0.16、0.45、1.3次/km。

表1 管道埋深影响系数

Table 1 Pipeline depth influence coefficient

埋深	地层	C_g	C_d
大于5 m		0.4	0.40
	洪积层	0.9	0.44
		2.0	0.20
		$0 \leq z < 0.3$	1.00
小于5 m	冲积层	$0.3 \leq z < 0.6$	0.70
		$0.6 \leq z < 1$	0.40
			1.00

由于地震动强度的不确定性,震后每根管道发生破坏的概率是随机的,管道泄漏面积也是随机的。在供气管道中间设置1个虚拟泄漏点,模拟整条管道的燃气泄漏量。震后管道泄漏面积的计算,可基于管道不同破坏状态的概率进行计算^[18],表达式为

$$A_L = (0.3P_{\text{I2}} + P_{\text{I3}}) A, \quad (6)$$

式中: A_L 为燃气管网的泄漏面积, m^2 ; A 为管道的截面面积, m^2 。

1.3 建立震后水力分析模型

目前,对于供气管网震后水力模型的研究较少,而在供水管网中,震后水力分析模型主要有3种^[19]:1)将破坏管道两端关阀并将管道从管网中剔除,对新的管网进行水力分析;2)在破坏管道中间增设渗漏节点,原管道被一分为二,再进行水力计算;3)将破坏管道渗漏流量分配到两端节点,再进行水力分析。这3种水力分析模型与供气管网的震后实际情况有所差异,不能直接套用。实际情况中,震后供气管网泄漏量较大的管道会被立即关阀,而泄漏量较小的管道则因泄漏量小且深埋地下而被保留下来,文中根据供气管网震后实际情况,结合震后供气管道的3种破坏状态与埋地燃气管道的泄漏模型,提出了改进的供气管网水力分析模型,对不同破坏状态的管道处理如下:

1)基本完好的管道。管道不发生泄漏,能够正常运行且不影响管网的水力。

2)中等破坏的管道。管道发生轻微泄漏,在管道中间增加1个渗漏节点,模拟管道的泄漏,根据管道泄漏口燃气的不同流速采用式(1)或(2)进行埋地燃气管道泄漏量计算。对于管道数为 m 、节点数为 n 的供气管

网,假设,漏损管道数目为 $x(x < m)$,则新生成管网管道数为 $m+x$,节点数为 $n+x$,新生成的管道长度为原管道的 $1/2$,管径与原管道管径相同,新生成泄漏节点的需求流量为所在泄漏管道的泄漏流量。以图 2 所示管道为例,管道 b 被一分为二,成为新的管道 b' 和 b'' ,并形成新的泄漏节点 a ,新的管道中, $l_b=l_k=0.5l_b, d_b=d_k=d_b, Q_a=q_{vb}$ 。

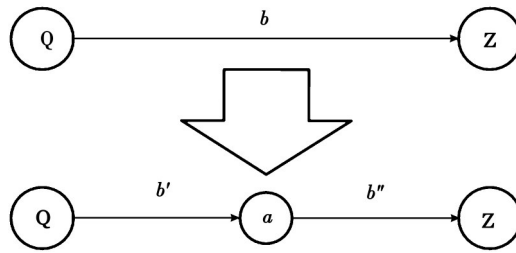


图 2 管道泄漏调整图

Fig 2 Pipeline leakage adjustment

3)严重破坏的管道。管道破裂、漏气严重,进行关阀处理。

通过对震后管道进行上述处理,得到的管网水力分析模型与震后供气管网实际工作状态更为接近。

2 基于 Monte Carlo 模拟的供气管网抗震功能可靠度计算

2.1 “压力驱动型”管网水力计算方法

进行供气管网水力分析时,根据管网供需平衡是否满足可将水力模型分为“流量驱动型”模型和“压力驱动型”模型 2 种^[20]。“流量驱动型”模型假定供气管网中各用户对流量需求始终能够得到满足,各节点可用流量即为用户需求流量,该模型对于震前管网的水力分析较为适用;“压力驱动型”模型适用于管网供需不平衡的情况,该模型将用户节点压力与需求流量的关系引入管网的流量平衡方程组,因此,“压力驱动型”水力模型计算结果更符合震后管网实际情况。

当供气管网稳定供气时,供气管网任何情况均需满足下列 3 个基本方程^[21]。

管道压力降计算公式:

$$\Delta P_j = s_j q_j^2, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

节点流量连续方程:

$$\sum_{j=1}^p a_{ij} q_j + Q_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

环能量方程:

$$\sum_{j=1}^p b_{ij} s_j q_j^2 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: p 、 m 、 n 分别为供气管网管道数、节点数、环数; ΔP_j 对于低压管道为管道 j 的压降,Pa;对于中、高压管道为管道压降平方差,kPa; s_j 为管道 j 的阻力系数; q_j 为管道 j 的流量, m^3/h ; a_{ij} 为节点 i 与管道 j 的关联元素,管道在节点起端, $a_{ij}=1$,管道在节点末端, $a_{ij}=-1$,否则, $a_{ij}=0$; Q_i 为节点 i 的需气量, m^3/h ; b_{ij} 为管道与环的关联元素, j 管道在环 i 中,方向与环方向一致, $b_{ij}=1$; j 管道在环 i 中,方向与环方向不一致, $b_{ij}=-1$; j 管道不在环路 i 中, $b_{ij}=0$ 。

“压力驱动型”模型与“流量驱动型模型”不同之处在于考虑了用户节点流量与压力的关系。用户节点流量与压力的关系采用式(10)进行计算:

$$Q_i^{avl} = \begin{cases} 0, & p_i \leq p^{\min}; \\ Q_i, & p_i \geq p^{\text{scv}}; \\ Q_i \sqrt{\frac{p_i - p^{\min}}{p^{\text{scv}} - p^{\min}}}, & p^{\min} \leq p_i \leq p^{\text{scv}}. \end{cases} \quad (10)$$

式中： Q_i^{avl} 为用户节点*i*可用流量， m^3/h ； Q_i 为用户节点*i*需求流量， m^3/h ； p^{sev} 为用户节点服务压力，Pa； p^{min} 为用户节点可用压力，Pa。

发生地震后，供气管网不稳定供气，将式(8)中的节点需求流量 Q_i 换为节点可用流量 Q'_i ，联立式(7)~(11)即可求得管网的水力特征值， Q'_i 计算式为

$$Q'_i = \begin{cases} Q_i^{avl}, & i \text{ 为用户节点} \\ Q_i, & i \text{ 为泄漏节点} \end{cases} \quad (11)$$

式中： Q'_i 为震后节点可用流量， m^3/h 。

2.2 基于 Monte Carlo 模拟进行水力分析

蒙特卡洛模拟，是一种以概率论和统计论为基础的数值计算方法，当需要求解某个事件出现概率或某个随机变量期望值，进行次数足够多的抽样试验，对所有抽样结果取均值，即可得到所求问题的近似解。

为反映地震时管网随机破损特征，文中耦合基于管道三态破坏概率的蒙特卡洛随机模拟生成天然气管网的不同破坏状态，再通过震后水力分析子模型生成新的拓扑结构，形成新的震损场景，对多次模拟生成的震损场景进行水力分析，即可得到设定地震下供气管网的水力服务状态，水力分析的步骤如下：

1) 基于管道的震害率，计算管道的三态破坏概率。

2) 基于线性同余法产生 m 个 0~1 之间的随机数 r ，当 $r < P_{f1}$ 时，管道处于基本完好状态；当 $P_{f1} < r < 1 - P_{f3}$ 时，管道处于中等破坏状态；当 $r > P_{f3}$ 时，管道处于严重破坏状态。

3) 对于管道不同的破坏状态，基于震后水力分析模型对管道进行处理，形成新的管网拓扑结构。

4) 进行震后管网水力计算，记录此时节点压力及可用流量，判断管网蒙特卡洛模拟次数是否达到设定值 w ，若达到进行下一步，若未达到，重复(1)~(4)的操作。

5) 计算多次蒙特卡洛模拟下，节点压力及可用流量的均值。

6) 输出节点压力及节点可用流量计算结果。

基于 Monte Carlo 随机模拟进行震后管网水力流程图如图 3 所示。

2.3 管网抗震功能可靠度计算

通过对震后管网的水力分析，可以得到震后管网的节点压力及节点可用流量，管网的功能可靠度主要体现在用户节点需求流量是否得到满足以及整个供气系统的水力状况综合评价，结合 Li 等^[22]提出的供气管网水力可靠度计算方法，震后供气管网的用户节点及系统抗震可靠度可按式(12)(13)进行计算。

用户节点抗震可靠度：

$$R_i = \frac{Q_i^{avl}}{Q_i}, \quad (12)$$

系统抗震功能可靠度：

$$R_{net} = \frac{\sum_n Q_i^{avl}}{\sum_n Q_i}, \quad (13)$$

式中： R_i 为用户节点*i*的抗震可靠度； R_{net} 为整个管网的系统抗震功能可靠度。

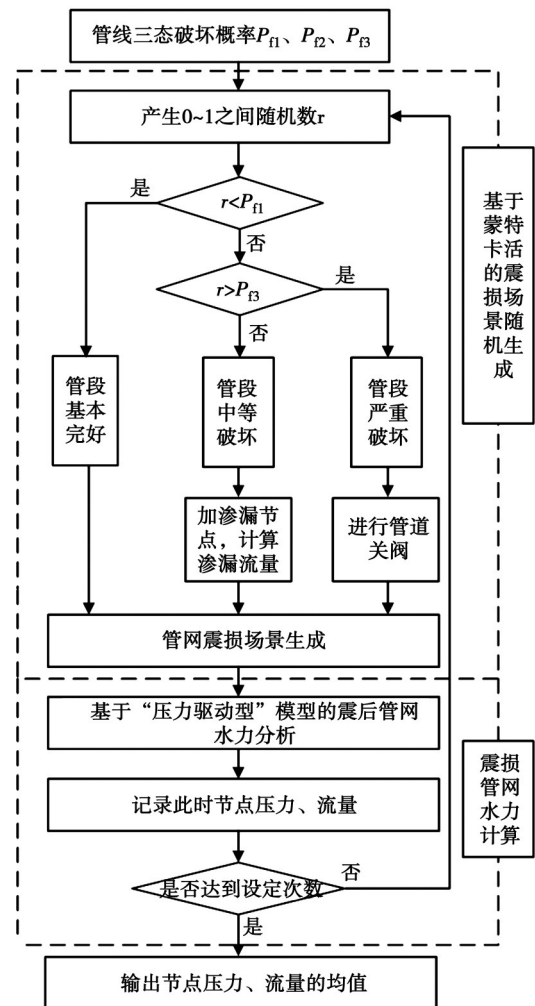


图3 随机模拟震后水力计算流程图

Fig. 3 Flow chart of random simulation hydraulic calculation after earthquake

文中基于计算求出的用户节点抗震可靠度,提出了震后用户节点服务状态量化标准,如表 2 所示。

表 2 节点用户抗震可靠度评价标准
Table 2 Node user reliability evaluation standard

参数	震后节点服务状态量化标准
$R_i=1$	供气正常
$0.8 \leq R_i < 1$	轻微缺气
$0.4 \leq R_i < 0.8$	中等缺气
$0 < R_i < 0.4$	严重缺气
$R_i=0$	供气中断

3 算例分析

某低压管网拓扑结构如图 4 所示,有 2 个气源点,1、19 为气源点,1 号气源点已知输送压力恒定为 3 000 Pa;19 号气源点已知输送流量恒定为 400 m³/h;管网管长、管径、管道初设流向及用户节点需求流量如图 4 所示,各管道均为铸铁管,输送气体为天然气,各用户节点服务压力为 2 650 Pa,最低压力为 2 100 Pa,对该燃气管网震前功能可靠性及 VI、VII、VIII 度地震下抗震功能可靠性进行评估。

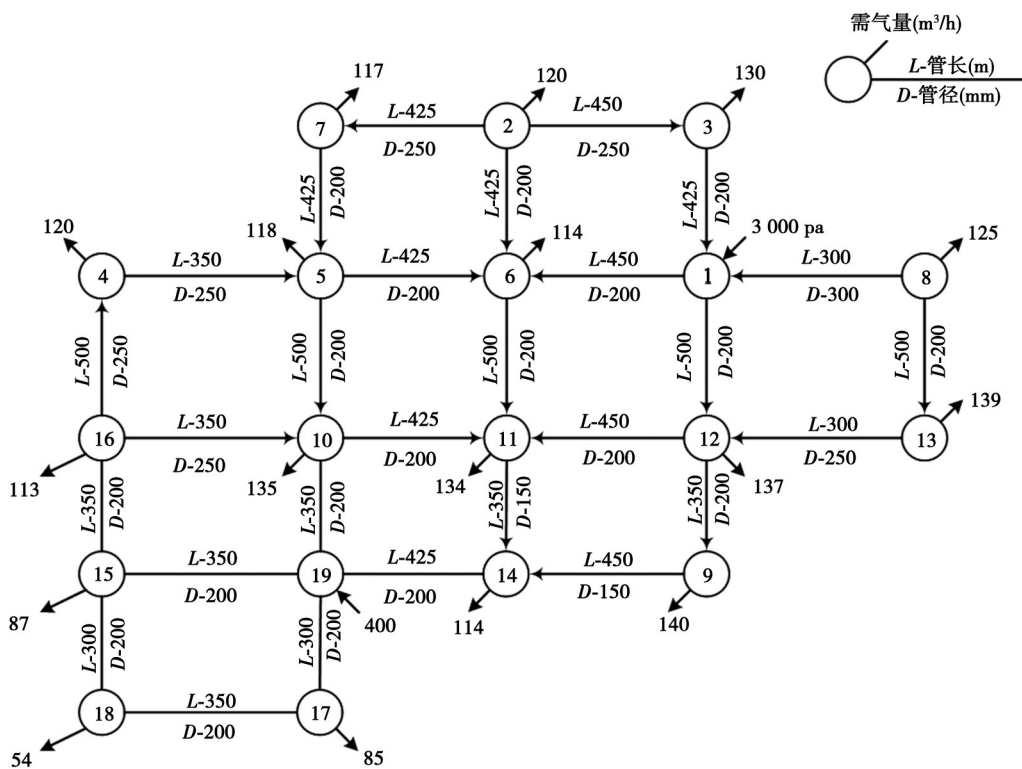


图 4 某低压管网结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a low-pressure pipe network structure

3.1 震后供气管网水力特性分析

基于 MATLAB 编制的供气管网水力分析程序,分别进行正常工况下及 VI 度、VII 度、VIII 度地震状况下供气管网的水力分析,设置蒙特卡洛模拟次数为 1 000 次,不同状况下各节点压力及用户节点可用流量计算结果,如图 5 和图 6 所示。

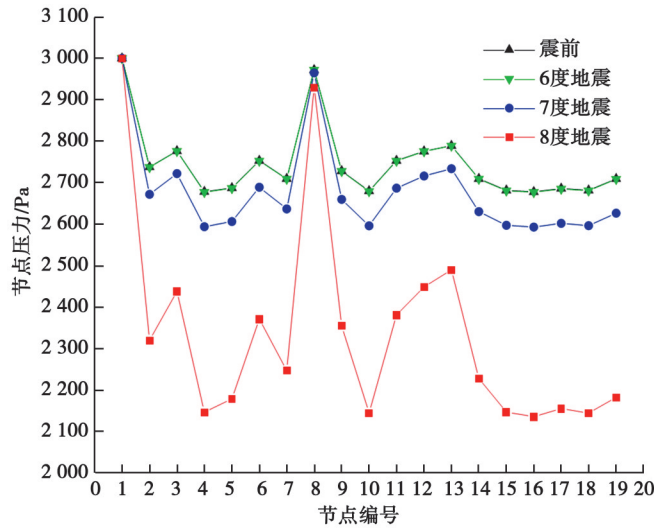


图5 不同地震状况下各节点气压对比图

Fig. 5 Comparison of air pressure at each node under different earthquake intensities

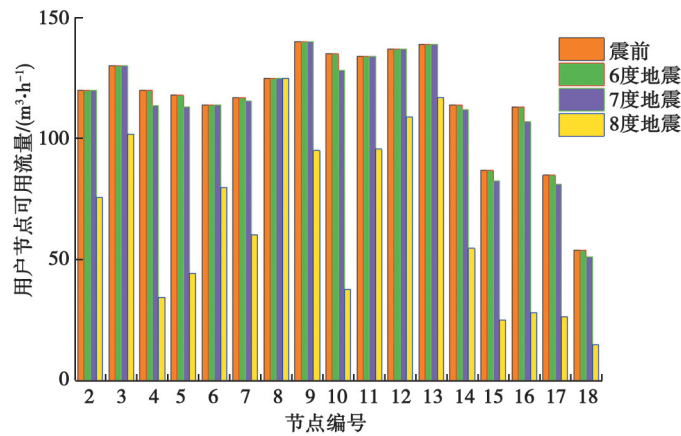


图6 不同地震状况下用户节点可用流量对比图

Fig. 6 Comparison of the available flow of user nodes under different earthquake intensities

与震前节点气压相比,VI度地震下用户节点气压与节点可用流量与震前基本一致,这是由于VI度地震下各管道发生破坏的概率很小,基本都处于完好状态,各节点可用流量均满足要求。

VII度地震时,大部分节点气压出现轻微下降,但节点可用流量下降幅度较小,这是由于VII度地震下,虽然有管道发生破坏,造成了节点气压下降,但用户节点气压仍接近节点服务压力。

VIII度地震时,除与压力基准点相连的节点8气压满足服务压力外,其余节点气压均小于服务压力,对应节点可用流量较震前出现较大幅度下降,不能满足用户需求。

3.2 供气管网抗震功能可靠性分析

计算出不同地震状况下用户节点可用流量,通过式(21)和式(22)可以计算出震后各用户节点抗震可靠度及整个供气管网的系统抗震功能可靠度,各用户节点抗震可靠度计算结果如表3所示。

可以看出,各用户节点在VI度地震下节点可靠度均为1,处于供气正常状态;VII度地震后,除节点3、6、8、9节点可靠度为1,供气正常外,其余用户节点可靠度均小于1,处于轻微缺气状态,从图4可以看出,处于轻微缺气状态的几个节点距离压力基准点相对较远,而附近的流量已知气源点供气量较小,无法满足附近节点需气量的要求;VIII度地震后,各节点可靠度变化趋势与VII度地震破坏下计算结果基本一致,节点8处于供气正常状态,节点3、6、12、13节点可靠度较高,这是由于节点距压力基准点较近,节点压力下降较小,节点16节点可靠度最低,低至0.251。

表3 用户节点抗震可靠度

Table 3 Reliability of user nodes under different earthquake intensities

节点编号	VI度	VII度	VIII度
1	气源点	气源点	气源点
2	1	1.000	0.631
3	1	1.000	0.784
4	1	0.947	0.289
5	1	0.959	0.377
6	1	1.000	0.701
7	1	0.988	0.516
8	1	1.000	1.000
9	1	1.000	0.680
10	1	0.949	0.281
11	1	1.000	0.714
12	1	1.000	0.796
13	1	1.000	0.841
14	1	0.982	0.481
15	1	0.951	0.289
16	1	0.946	0.251
17	1	0.955	0.314
18	1	0.950	0.282
19	气源点	气源点	气源点

不同地震状况下供气管网抗震功能可靠度计算结果如表4所示。可以看出,该供气管网在VI度、VII度地震下系统抗震功能可靠性较高,在VIII度地震下系统抗震功能可靠性大幅度降低。

表4 供气管网系统抗震功能可靠度

Table 4 Functional reliability of pipeline network under different earthquake intensities

地震状况	震前	VI度	VII度	VIII度
R_{net}	1.000	1.000	0.981	0.569

4 结论

1)将管道的震后破坏状态与埋地燃气管道泄漏子模型结合起来,建立了考虑轻微泄漏的供气管网震后水力分析模型,该模型能较好地反映震后管网实际工作状况。

2)基于蒙特卡洛模拟方法随机生成震损场景,基于“压力驱动型”模型对每一震损场景进行了管网水力计算,对多次模拟结果取均值作为管网在该地震状况下的水力计算结果,能够较好地反映震后燃气管网水力状况。

3)文中将供气管网的水力计算方法、震后水力分析模型、管道泄漏模型与管网功能可靠度计算方法进行集成,提出了一套供气系统抗震功能可靠性分析方法,该方法可用于供气管网的震后水力计算及抗震功能可靠性评价,具有重要参考意义。

4)以一个简单的供气管网为例,进行了抗震功能可靠性评估,证明了该方法的可行性。算例计算结果表明,距离压力气源点越近,震后节点可靠度越高,压力恒定气源附近节点可靠度较流量恒定气源点附近节点可靠度高。

参考文献

- [1] 李明菲, 周利剑, 郑洪龙, 等. 我国天然气管网系统可靠性评价技术现状[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 464-468.
Li M F, Zhou L J, Zheng H L, et al. Current reliability assessment techniques for natural gas pipeline networks in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 464-468. (in Chinese)
- [2] 宗成才, 冀昆, 毕熙荣, 等. 衔接GMPE的城市燃气管网连通易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(6): 184-191.
Zong C C, Ji K, Bi X R, et al. Seismic connectivity fragility analysis for urban gas network using GMPE[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(6): 184-191. (in Chinese)
- [3] 宗成才. 城市燃气管网抗震韧性定量评估与提升[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.
Zong C C. Quantitative assessment and improvement of seismic resilience for the urban gas network[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese)
- [4] 李军, 玉建军, 严铭卿, 等. 城市燃气输配管网可靠性的多视角分析[J]. 煤气与热力, 2021, 41(1): 32-35, 43-44.
Li J, Yu J J, Yan M Q, et al. Multi-perspective analysis on reliability of urban gas transmission and distribution network[J]. Gas & Heat, 2021, 41(1): 32-35, 43-44. (in Chinese)
- [5] Liu W, Li Z C, Song Z Y, et al. Seismic reliability evaluation of gas supply networks based on the probability density evolution method[J]. Structural Safety, 2018, 70: 21-34.
- [6] Cavalieri F. Seismic risk assessment of natural gas networks with steady-state flow computation[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2020, 28: 100339.
- [7] 焦文玲, 任乐梅, 唐胜楠, 等. 城镇燃气管网事故工况及失效程度评价研究[J]. 煤气与热力, 2019, 39(11): 1-6, 13, 41.
Jiao W L, Ren L M, Tang S N, et al. Research on accident conditions and failure evaluation of city gas pipeline network[J]. Gas & Heat, 2019, 39(11): 1-6, 13, 41. (in Chinese)
- [8] 范慕炜, 宫敬, 伍阳, 等. 基于简化拓扑结构的陕京天然气管网供气可靠性分析[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 123-129.
Fan M W, Gong J, Wu Y, et al. Gas supply reliability analysis of the Shaanxi - Beijing gas pipeline network based on the simplified topological structure[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4): 123-129. (in Chinese)
- [9] 王祥建, 郭恩栋, 张丽娜, 等. 汶川地震燃气管网震害分析[C]// 纪念汶川地震一周年地震工程与减轻地震灾害研讨会. 中国建筑学会; 中国地震学会, 2009.
Wang X J, Guo E D, Zhang L N, et al. Analysis of earthquake damage in Wenchuan earthquake gas pipeline network [C]// Symposium on Earthquake Engineering and Earthquake Mitigation to Commemorate the First Anniversary of Wenchuan Earthquake. Architectural Society of China; Chinese Seismological Society, 2009. (in Chinese)
- [10] 王祥建, 郭恩栋, 张美晶. 汶川地震燃气管道震害分析及对策[J]. 世界地震工程, 2012, 28(4): 44-50.
Wang X J, Guo E D, Zhang M J. Analysis and countermeasures on seismic damages to gas pipeline in Wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 44-50. (in Chinese)
- [11] 和丽荣, 杜坤, 宋志刚, 等. 城市供水管网抗震可靠性评估的随机模拟方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 62-69.
He L R, Du K, Song Z G, et al. Stochastic simulation method for seismic reliability assessment of urban water distribution system[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(2): 62-69. (in Chinese)
- [12] 郭恩栋, 刘如山, 孙柏涛. 地下管线工程地震破坏等级划分标准[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 86-90.
Guo E D, Liu R S, Sun B T. Gradation criterion of earthquake damage to buried pipeline engineering[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(4): 86-90. (in Chinese)
- [13] 黄小美, 彭世尼, 徐海东, 等. 燃气管道泄漏流量的计算[J]. 煤气与热力, 2008, 28(3): 37-42.
Huang X M, Peng S N, Xu H D, et al. Calculation of leakage rate from gas pipeline[J]. Gas & Heat, 2008, 28(3): 37-42. (in Chinese)

- [14] 高立娜. 城市燃气系统抗震防灾对策研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2018.
Gao L N. The countermeasure research of earthquake disaster prevention in the city gas system[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] 韩光洁. 埋地燃气管道泄漏量计算及扩散规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Han G J. Research on the leakage of buried gas pipeline and diffusion regularity[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [16] Isoyama R , Katayana T . Practical Performance Evaluation of Water Supply System During Seismic Disaster[C]// Lifeline Earthquake Engineering. ASCE, 2015.
- [17] 金康锡, 任爱珠. 煤气管道的震害率分析[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 148-153.
Jin K X, Ren A Z. Analysis of earthquake damage ratio of buried gas pipe[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(3): 148-153. (in Chinese)
- [18] Ballantyne D B , Taylor C . Earthquake Loss Estimation Modeling of the Seattle Water System Using a Deterministic Approach[C]// Lifeline Earthquake Engineering. ASCE, 1991.
- [19] 程鹏. 给水管网系统震后水力状态评价及可恢复性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Cheng P. Hydraulic state estimation and recoverability study for post-earthquake water supply network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [20] 唐胜楠. 城市燃气管网事故工况模拟及调度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Tang S N. Hydraulic analysis and optimal operation of city gas pipeline network in case of emergency[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [21] 田贯三, 张增刚, 江亿. 城镇天然气管网水力分析数学模型与计算方法[J]. 天然气工业, 2002, 22(3): 96-98.
Tian G S, Zhang Z G, Jiang Y. Mathematical model and algorithms of hydraulic analysis of city natural gas pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(3): 96-98. (in Chinese)
- [22] Li J, Qin C K, Yan M Q, et al. Hydraulic reliability analysis of an urban loop high-pressure gas network[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 28: 372-378.

(编辑 陈移峰)