

基于风险评价的管道安全距离确定方法

张华兵 王新

中国石油管道科技研究中心 中国石油天然气集团公司油气管道输送国家工程实验室

2016-06-21

摘要:合理确定管道安全距离,不仅可以减少事故造成的损失,还可以为管线的合理设计提供依据。在分析管道定量风险评价结果的基础上,根据《危险化学品生产、储存装置个人可接受风险和社会可接受风险标准》所规定的风险可接受标准,将管道周边划分为不同的风险区域,提出了基于风险的管道安全距离确定方法。实例应用表明:基于风险评价的管道安全距离确定方法,可以体现管道本身特性和外部环境的差异性,比如不同的管道壁厚、埋深、运行压力及第三方等,因此针对性较强,比基于法规和标准确定管道安全距离的方法更加科学合理,可以为在役及新建管道安全距离的确定提供参考。

关键词:管道;安全距离;失效频率,失效后果,风险

截止2015年,我国油气管道运营里程已达12万公里,随着管道里程的不断增多及城市化的不断推进,越来越多的管道进入到了人口密集区。油气介质易燃易爆,一旦泄漏,引发火灾或爆炸事故可能对周边的人员和财产造成重大威胁^[1]。合理确定管道安全距离,不仅可以减少事故造成的人员和财产损失,还可以为管线的合理设计及土地规划提供依据。

近年来,国内外很多政府及学者开展了管道安全距离的研究。目前,管道安全距离的确定方法主要有两种:一种是基于法规和标准的管道安全距离确定方法,一种是基于风险评价的管道安全距离确定方法。

国内主要采用基于法规和标准的管道安全距离确定方法,比如《石油天然气管道保护法》第三十一条规定:“在管道线路中心线两侧建筑物、构筑物与管道线路和管道附属设施的距离应当符合国家技术规范的强制性要求;《输油管道工程设计规范》(GB50253—2014)将输油管道与城镇居民点或重要公共建筑的距离不应小于5m^[2];《输气管道工程设计规范》(GB50251—2015)规定管道与建(构)筑物的距离不应小于5m^[3]。

基于法规和标准的管道安全距离多来自实验数据及事故总结,这种确定方法主要优点是便于实际操作,但所有管道使用统一化的要求,无法体现管道及周边环境的变化,科学性不强,无法针对性的保障管道沿线的安全性。同时国内涉及安全距离的标准多参考欧美标准,与欧美相比,我国管道特性的外部环境有很大不同。

基于风险评价的管道安全距离的确定方法,可以体现管道本身特性和外部环境的差异性,比如不同的管道壁厚、埋深、运行压力及周边环境等。因此针对性较强,比基于法规和标准确定管道安全距离的方法更加科学合理,但技术较为复杂。

1 风险计算方法

1.1 管道失效频率分析

管道失效频率的计算方法可归纳为基于历史失效数据的修正法和基于管道结构可靠性分析的方法两类。基于历史失效数据的修正法是指参考管道历史失效频率,并根据被评管段实际情况,依靠技术人员的经验对历史失效频率进行修正,使其更加符合管道的实际情况^[4-7]。

基于结构可靠性分析的方法是在分析管道作用荷载的基础上,利用结构力学相关理论对管道进行应力分析;然后依据应力—强度干涉理论,把影响管道强度和应力的参数看作随机变量,建立管道失效的极限状态方程,求解管道的失效频率^[8]。

目前基于历史失效数据的修正法应用较多,主要计算公式如下^[4]:

$$F = F_{av} \times A \quad (1)$$

式中: F 为管道失效频率, F_{av} 为管道失效频率统计值, A 为修正因子。

1.2 管道失效后果分析

油气管道泄漏后，对周边的人员安全会造成巨大的威胁，其失效后果类型与泄漏速率、点燃时间、泄漏点环境等因素有关。管道泄漏后火灾的热辐射作用和爆炸的破坏作用是管道周边人和建筑物的主要危害来源。

失效后果分析主要计算管道周边不同距离处热辐射或者超压值，然后通过后果伤害准则将热辐射值或者超压值转换为不同距离处人员死亡概率。

人员死亡概率作为管道失效后果伤害载荷的函数，可以通过概率变量的线性化概率函数获得^[9]：

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_r} e^{-s^2/2} ds \quad (2)$$

式中： P_d 为死亡概率； s 为积分变量； P_r 为概率变量，描述具体伤害载荷（如冲击波、热辐射等）与受体伤害情况（比如死亡或受伤）的剂量——反应关系，如下式^[10]

$$P_r = a + b \ln(D) \quad (3)$$

式中： a 和 b 是反映具体伤害荷载和受体对伤害荷载感受性的经验常数， D 是给定暴露时间下伤害荷载的剂量。

1.3 风险计算

个人风险是因各种潜在事故造成区域内某一固定位置内未采取任何保护措施的人员死亡的概率，通常用年死亡概率表示。对于区域内的任一危险源，其在区域内某一地理坐标为 (x, y) 处产生的个人风险都可由下式计算^[11]：

$$IR = \sum_M \sum_I f \times P_M \times P_i \times P_d \quad (4)$$

式中： f 为管道失效频率； P_M 为气象条件概率； P_i 为点火概率； P_d 为人员死亡概率。

2 管道安全距离的确定

2.1 划分不同风险区域

国家安监总局在对发达国家土地安全规划、安全距离确定方法进行广泛调研和分析的基础上，结合我国国情，于2014年4月22日提出《危险化学品生产、储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准》^[12]，见表1。此标准针对的是危化行业，但管道行业可以参考使用。

表1 新建及在役装置个人风险可接受标准

类别	周边重要目标和敏感场所分类	新建装置个人风	在役装置个人风
		险可接受标准 (/a)	险可接受标准 (/a)
A	低密度人员场所（人数<30人）：单个或少量暴露人员。	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 3 \times 10^{-5}$
	1.居住类高密度场所（30人 \leq 人数<100人）：居民区、宾馆、度假村等；	$\leq 3 \times 10^{-6}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
B	2.公众聚集类高密度场所（30人 \leq 人数<100人）：办公场所、商场、饭店、娱乐场所等。		
	1.高敏感场所：学校、医院、幼儿园、养老院、监狱等；	$\leq 3 \times 10^{-7}$	$\leq 3 \times 10^{-6}$
C	2.重要目标：军事禁区、军事管理区、文物保护单位等；		
	3.特殊高密度场所（人数 ≥ 100 人）：大型体育场、大型交通枢纽等。		

根据表 1，可以将新建及在役管道划分为四个风险区域 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 ，其中区域 Z_1 表示个人风险值 $\geq 1 \times 10^{-5}$ ，区域 Z_2 表示 $3 \times 10^{-6} \leq$ 个人风险值 $\leq 1 \times 10^{-5}$ ，区域 Z_3 表示 $3 \times 10^{-7} \leq$ 个人风险值 $\leq 3 \times 10^{-6}$ ，区域 Z_4 表示个人风险值 $\leq 3 \times 10^{-7}$ 。在 Z_1 区域，新建管道的个人风险值 $IR \leq 1 \times 10^{-5}$ ，在役管道的个人风险值 $\leq 3 \times 10^{-5}$ 。区域内人数应 < 30 人，如果超过，管道应改线或者将建筑物搬离。

2.2 确定不同风险区域的安全距离

根据管道运行及周边实际情况，开展管道定量风险计算，可以得出不同风险分布的对应管道垂直距离值。一般来讲，距离管道的垂直距离越大，则风险值越小，即距离管道越远，人身安全性越高。接下来可划分风险区域，各风险区域代表容许的敏感场所的类别和人员密度，各风险区域的边界与管道垂直距离即最终确定的管道安全距离。

以具体某管道的一高后果区管段为例进行计算，主要输入参数见下表2：

表2 主要输入参数

参数	值
管材	L485
外径	720mm
管壁厚度	10mm
输送介质	天然气
管道长度	2 km
运行压力	6 MPa

确定的安全距离见下表3。从表中可以看出，确定的安全距离值相比现有标准规范给定的值大很多。这主要原因是由于管道风险可接受标准参考危化行业确定，对管道行业来讲，过于严格。

表3 某高后果区管段（新建管道及在役管道）安全距离

周边重要目标和敏感场所类别	新建管道安全距离 (m)	在役管道安全距离 (m)
A	180	118
B	240	180
C	302	240

3 问题讨论

3.1 管道失效频率计算的不确定性

目前，基于管道历史失效数据修正的失效频率计算存在两个问题：一是管道失效频率统计平均值没有统一值。管道失效频率的计算通常需要大量的历史失效统计数据，国内缺乏管道历史失效数据库，欧美等发达国家起步较早，而国内在管道历史失效数据的收集和分析方面尚处于起步阶段，管道失效事故统计数据量远远不足^[13]。目前，国内在管道失效频率计算中大多参考国外失效数据库，且不同国家和组织的统计平均值不一致，评价人员采用时没有统一值，导致最终计算得出的失效频率值具有很大不确定性。

二是对管道历史失效频率的修正过程中，主观性较强。对管道历史失效频率的修正往往采用基于专家知识经验的主观评价方法，如API 581中给出了一种基于指标体系的修正方法^[14]。但是采用该方法进行管道失效率确定存在很大的主观性，受评价人员影响较大，也导致了计算过程存在不确定性。

3.2 管道失效后果计算时的模型选择

管道失效后果的计算大多利用相应的数值仿真或者解析模型来进行计算，由于数值仿真方法计算效率低下，目前解析模型应用较多。如池火研究主要采用Thomas模型、Heskestad模型等^[15-16]，喷射火模型有单点源模型、多点源模型和固体火焰模型等^[17-20]。

这些计算模型各有特点及其适用范围，评价人员在模型选择时，必须对其进行深入了解，不同模型的计算结果会有一些的误差，最终间接影响了确定的管道安全距离的精度。

3.3 管道风险可接受风险标准的确定

目前管道行业的风险可接受标准参照了危化行业的已有标准，危化行业的危险性比管道行业高，因此国家安监总局制定的风险可接受标准很严格。管道行业直接参照此标准后，从实际应用过程中来看，此标准对管道行业过于严格，确定的安全距离比目前基于标准规范确定的安全距离大很多，虽然保证了管道沿线人员的安全性，但不利于管道沿线土地的合理利用。因此，应根据管道行业的特点，基于管道行业的历史事故率提出要保证的管道目标安全水平，从而制定相应的风险可接受标准。

4 结论

经过上述分析讨论，本文主要结论如下：

(1) 目前，国内管道安全距离的确定多基于法规及标准确定，本文提出的方法具有更强的针对性和科学性，但计算过程较为复杂。

(2) 实施基于风险评价的管道安全距离，需要注意管道失效频率计算、管道失效后果模型选择和管道风险可接受标准等技术问题。

参考文献：

- [1] 姚伟. 油气管道安全管理的思考与探索[J]. 油气储运, 2014, 33 (11) : 1145-1151.
YAO W. Thinking and exploration on the safety management of oil/gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (11) : 1145-1151.
- [2] 叶学礼, 苗成武, 章申远, 等. 输气管道工程设计规范: GB 50251—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015: 12-13.
YE X L, MIAO C W, ZHANG S Y, et al. Code for design of gas transmission pipeline engineering: GB 50251—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015: 12-13.
- [3] 朱坤锋, 张文伟, 王彦, 等. 输油管道工程设计规范: GB 50253—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 10-11.
ZHU K F, ZHANG W W, WANG Y, et al. Code for design of oil transmission pipeline engineering: GB 50253—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014: 10-11.
- [2] 戚爱华. “十二五”中国油气管道运输发展趋势分析[J]. 综合运输, 2011 (4) : 15-18.
QI A H. Analysis of the development trend of China's oil and gas pipeline transportation in 12th Five-Year[J]. Comprehensive Transportation, 2011 (4) : 15-18.
- [3] 艾慕阳. 大型油气管网系统可靠性若干问题探讨[J]. 油气储运, 2013, 32 (12) : 1265-1270. AI M Y. Discussion on issues regarding the reliability of large scale oil and gas pipeline network systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(12): 1265-1270.
- [4] 张华兵, 冯庆善, 郑洪龙, 等. 油气长输管道定量风险评价[J]. 中国安全生产科学学报, 2008, 18 (3) : 161-165.
ZHANG H B, FENG Q S, ZHENG H L, et al. Quantitative risk analysis of oil and gas long-distance pipeline [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18 (3) : 161-165.

- [5] 朱勇, 林冬, 刘雅坤, 等. 基于统计数据与现状分析的管道失效频率计算方法[J]. 焊管, 2016, 39 (8) : 41-48.
ZHU Y, LIN D, LIU Y K, et al. A calculation method of pipeline failure frequency based on statistical data and status analysis [J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39 (8) : 41-48.
- [6] 靳书斌, 郑洪龙, 侯磊, 等. 高压燃气管道第三方破坏失效概率计算[J]. 油气储运, 2014, 33 (5) : 510-514.
JIN S B, ZHENG H L, HOU L, et al. Calculation of failure probability of the third-party interference for high pressure gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (5) : 510-514.
- [7] 张华兵. 基于失效库的在役天然气长输管道定量风险评估技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 53-62.
ZHANG H B. Study on quantitative risk assessment of in-service long-distance natural gas pipeline based on failure Database [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 53-62.
- [8] 黄小美, 李百战, 彭世尼, 等. 燃气管道失效概率评估方法研究[J]. 石油学报, 2010, 31 (4) : 661-664.
HUANG X M, LI B Z, PENG S N, et al. Assessment methods of failure probability on gas pipelines [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (4) : 661-664.
- [9] LEI M, YONG S L, LEI L, et al. A novel method of quantitative risk assessment based on grid difference of pipeline sections[J]. Safety Science, 2013 (59) : 219-226.
- [10] JO Y D, AHN B J. Analysis of hazard areas associated with high pressure natural-gas pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2002, 15 (3) : 179-188.
- [11] LEI M, LIANG C, MAN C L. Quantitative risk analysis of urban natural gas pipeline networks using geographical information systems [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013 (26) : 1183-1192.
- [12] 国家安全生产监督管理总局. 危险化学品生产、储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准[S]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2014 (13) : 1-2.
The State Administration of National Security. The individual acceptable risk criteria and social acceptable risk standards of hazardous chemicals production and storage devices [S]. Beijing: The State Administration of National Security, 2014 (13) : 1-2.
- [13] 王婷, 玄文博, 周利剑, 等. 中国石油油气管道失效数据管理问题及对策[J]. 油气储运, 2014, 33 (6) : 577-581.
WANG T, XUAN W B, ZHOU L J, et al. Issues in PetroChina's management of pipeline failure data and corresponding solutions [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (6) : 577-581.
- [14] American Petroleum Institute. Risk based inspection methodology: API581—2016 [S]. Washington, D.C.: API Publication, 2016: 3-6.
朱喜平 张来斌 梁伟, 等. RBI技术在长输管道压气站风险评估中的应用[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(7): 165-168.
ZHU X P, ZHANG L B, LIANG W, Application of RBI technology in risk assessment of long distance pipeline compressor station, Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(7): 165-168
- [15] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995: 200-202.
FAN W C, WANG Q G, JIANG F H, et al. A concise course of fire science [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995: 200-202.
- [16] 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院. 石化装置定量风险评估指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 56-98.
Sinopec safety engineering institute. A guidance for quantitative risk assessment in the petrochemical plant [M]. Beijing: China petrochemical press, 2007: 56-98.
- [17] STEPHENS M J, LEEW I K, MOORE D K. A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines [C]. Alberta: The 4th International Pipelines Conference, 2002: 759-767.
- [18] 谷志宇, 董绍华, 牛景弘, 等. 天然气管道泄漏后果影响区域的计算[J]. 油气储运, 2013, 32 (1) : 85-87.
GU Z Y, DONG S H, NIU J H, et al. Calculation for influenced area of consequences of natural gas pipeline leaks [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32 (1) : 85-87.
- [19] 王小完, 马骥, 骆正山. 基于天然气管线泄漏蒸汽云爆炸危害分析[J]. 灾害学, 2013, 28 (3) : 16-19.
WANG X W, MA J, LUO Z S. Hazard analysis on vapor cloud explosion base on nature gas pipeline leakage [J]. Journal of catastrophology, 2013, 28 (3) : 16-19.
- [20] SPYROS S, FOTIS R. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the

Process Industries, 2006, 19 (1) : 24-21.

原发表于《油气储运》2018.1