

油气长输管道定量风险评价

张华兵 冯庆善 郑洪龙 税碧垣

(中石油管道研究中心完整性研究所, 廊坊 065000)

【摘要】风险评价是管道完整性管理的基础, 为保障完整性管理的顺利实施, 有必要开展管道风险评价的研究。目前风险评价普遍采用以 Kent 打分法为代表的定性方法, 本文提出了一种新方法, 即定量风险评价 (QRA), 采用基于管道失效历史数据库和已有成熟的数值模型, 进行管道失效概率分析和失效后果分析, 并以此方法在某输气管道上进行了验证, 最后得到管段的绝对风险和人口密集段的个人风险, 并进行了风险预测。研究表明, QRA 受人员主观判断影响较小, 计算方法科学合理, 结果量化, 对进行检测与维护维修资源的分配具有很好的指导意义。

【关键词】管道; 定量风险评价法 (QRA); 个人风险; 失效历史数据库; 完整性管理;

0 引言

油气长输管道是国家经济的大动脉, 直接服务沿线工业的生产和城市居民的普通生活。但管道又属于危险源, 一旦发生泄漏事故, 易燃易爆的高压介质迅速扩散, 对沿线造成较大危害。如1999年美国华盛顿Beirut市一条成品油管道发生泄漏起火事故, 造成2人死亡, 大量油品泄漏, 环境严重污染; 2000年美国加州的Carlsbad市一条天然气管道泄漏并爆炸, 造成12人死亡; 2004年, 陕西榆林境内某输气管道发生泄漏, 紧急疏散方圆10km内人员, 造成恶劣影响^[1]。

管道完整性管理是一种主动预防的管道管理方法, 是先进管道公司管理经验的总结提炼, 以被国际上纵多管道公司所采用, 如著名的 Enbridge 管道公司、加拿大彩虹管道等^[2]。目前美国法规已经强制要求各管道公司必须对管道实行完整性管理, 而完整性管理的基础是管道的风险评价, 其主要目的是识别危害和管段风险排序, 以完成对管道检测、维护维修资源的科学决策^[3]。所以进行风险评价的研究, 开发有效的风险评价实施方法, 对保证管道完整性管理的实施, 保障油气管道的安全运行, 具有重大的意义。

1、管道风险评价现状及定量风险评价 (QRA) 简介

管道风险评价按照最后结果的量化程度, 可以分为定性方法、定量方法两种。定性方法以 W.Kent Muhlbauer 于 1995 年著的“管道风险管理手册”为代表^[4], 简称 Kent 打分法, 至今已第二版, 仍在世界上各管道公司广泛使用, 定量方法近几年才出现, 以 QRA 为典型代表, 国外管道公司一般也以定性方法为主, 对复杂项目和重点管段才采用 QRA^[5]。国内管道风险评价基本上还处于起步阶段, 理论研究较多, 油气场站评价较多, 简单方法采用较多, 如故障树 (FAT) 的定性分析、作业条件危险性评价 (LEC) 等^[6-9]。为突破传统的定性评价方法, 也有一些研究结合了数学方法如模糊数学^[10], 以实现定量的评价, 但基本还处于理论研究阶段, 无工业应用。

QRA 是一种纯定量的方法, 是目前管道风险评价的最新成果, 其结果一般是具体的数值, 且有量纲。QRA 主要基于管道历史失效数据库进行, 通过将实际管道与失效数据库中的抽象管道对比, 并通过一些经验模型进行公式推导, 从而得到相应结果, 如绝对失效概率, 管段年千米经济损失等。QRA 主要流程见下图:

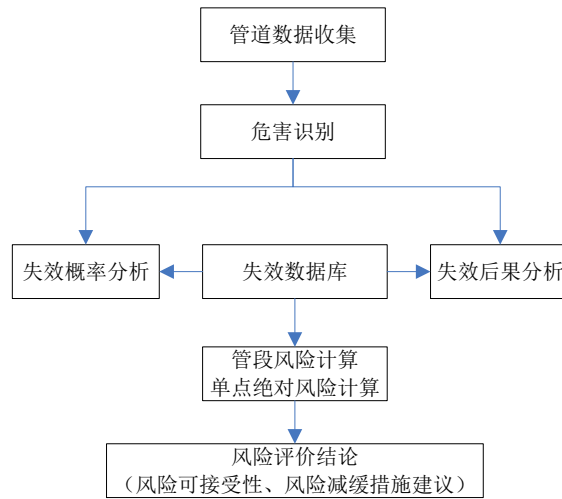


图 1 QRA 流程图

2、QRA 的主要技术

QRA 的主要技术有管道失效概率分析，失效后果分析，以及最后风险值的计算，这几个过程与传统的 Kent 打分法不同的是，不需要管道专家进行主观的定级判断，基本是基于历史数据库和数值模型推导。下面将一一介绍。

2.1 管道失效概率分析

影响管道安全的因素大抵可以分为以下几类：

- 1) 腐蚀，包括内腐蚀、外腐蚀和应力腐蚀开裂（SCC）；
- 2) 管体缺陷，包括制管缺陷和施工期间造成的缺陷；
- 3) 第三方破坏；
- 4) 误操作；
- 5) 设备缺陷；
- 6) 自然与地质灾害，包括滑坡、泥石流、崩塌、地表沉陷等；
- 7) 疲劳。

有些管道应力腐蚀开裂和疲劳等问题并不存在或不严重，可不考虑。QRA 中在计算管道失效概率时，将各类因素分别考虑，以下式来计算：

$$F_p = F_g \times F_t \times F_a \quad (1)$$

式中， F_p ——各原因引起管道失效的概率；

F_g ——通用失效概率，统计大量事故案例得到的管道平均失效概率；

F_t ——每种失效模式所占的比例，各失效模式有管道小泄漏、大泄漏和破裂；

F_a ——修正系数。

其中 F_g 和 F_t 是根据历史失效数据库得到的， F_a 是将管道的实际情况与历史库中管道实际情况对比得到的修正系数。

欧洲和北美很多国家的一些组织和协会早在 30 年前，就开始收集和统计工业事故失效案例，并建立大型的历史失效数据库，其中有名的管道失效数据库有 AGA、EGIG 等，一些公司也建有自己的历史失效数据库。欧洲石油公司公布了 1971—1993 年其输油管道失效概率，具体数据如下表所示：

通用失效概率表

管道失效原因	所占百分比	失效概率 F_g (/km.a)
管体缺陷（制管和施工）	26	1.27×10^{-4}
误操作	7	3.43×10^{-5}

腐蚀（内外腐蚀）	30	1.47×10^{-4}
地质灾害	4	1.96×10^{-5}
第三方破坏	33	1.62×10^{-4}
总计	100	4.90×10^{-4}

由于积累了大量的管道失效案例，各个历史失效数据库的统计值相差不大，一般不会超过一个数量级。

各失效原因引起的管道失效模式所占比例 F_t 是不一样的，如腐蚀引起的绝大部分失效为小泄漏，而地质灾害则有一半为管道破裂。美国联邦应急管理中心（FEMA）1999 年公布的统计数据表明，地震引起的管道失效模式为：80%的管道破裂，20%的管道泄漏。

历史失效数据库中统计得到的各失效概率是针对代表性的管道的，如统计标明，应力腐蚀开裂引起的管道失效概率为 3×10^{-5} ，其针对的代表性管道的属性如下：①管道年龄：20 年；②管径：914mm；③压力：6.895MPa；④是否易于形成局部腐蚀环境：一般；⑤管体对应力腐蚀开裂的敏感性：一般；⑥壁厚：9.14mm；⑦SMYS：448MPa。

如果被评价管道与上述属性有较大差异，则通过 F_a 来修正。

2.2 管道失效后果的计算

管道泄漏后果大小影响因素众多，有泄漏介质属性、泄漏量大小及泄漏点环境等，泄漏之后的事态发展可用事件树来进行分析，下面的事件树以天然气管道为例：

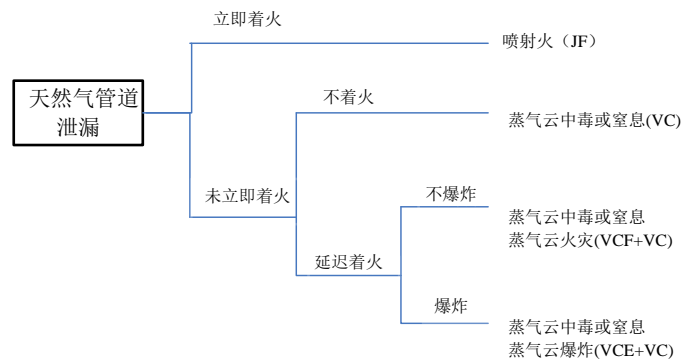


图 2 天然气管道泄漏事件树

如上图所示，天然气管道泄漏后，有 4 种后果模式。各种后果模式所导致的后果大小是不一样的，以 $VCE+VC$ 模式为最。各后果模式所占比例也是变化的，主要与管道失效模式及管道周围的土地用途有关，风向及风速也有一定影响。最后的比例也是可以根据历史数据统计得到的。

各后果模式最后的影响可以分为人员伤亡和经济损失，危险液体管道还需要考虑环境破坏影响，每种后果模式造成的各类影响需要分别估算，并在最后都可以折算为经济损失大小（单位为¥或\$）。

例如：计算人员伤亡影响，首先要考虑泄漏量。天然气的泄漏量与泄漏速率、流速、截断阀位置和紧急响应时间有关。已经有一些经验公式可以采用^[1]。然后根据图 2 中 4 种后果模式分别作用于人体产生的影响，主要是火灾、爆炸、热辐射、中毒和窒息等对人体的影响，结合各影响因素作用于人体导致死亡的下限值，计算得到最后的人员伤亡情况。

2.3 风险的计算

由于管道各属性沿管道一直是变化的，如壁厚、压力、高程、土地用途等，所以需要管道分为多个管段，各相邻的两个管段必有一个属性不同。根据上面的计算，可以得到每个管段的失效概率和失效后果，最后用下式进行综合，可以得到管段的风险值。

$$R_{jm} = \sum_{k=1}^3 \left[\sum_{l=1}^L F_{jkl} \right] \times C_{jkm} \quad (2)$$

式中，R——风险；

F——失效概率；

C——失效后果；

J——各管段；

K——失效模式（k=1 为小泄漏，k=2 为大泄漏，k=3 为破裂）；

L——失效原因（内腐蚀、外腐蚀、第三方破坏等，L 为总数）；

M——后果类别（人员伤亡、经济损失、环境影响等）。

风险值的单位为¥/km.a（元每千米每年），表示管道每年每千米可能的经济损失大小。由于管道泄漏造成的人员伤亡造成的影响最为恶劣。对于单点的风险绝对风险计算，QRA 还专门提供表征人员伤亡影响大小的指标——个人风险值（Individual Risk），表示人员在管道周围某一点死亡的概率。在英国、荷兰等国家还制定了个人风险值的可接受标准，这样就可以很方便的衡量管道的安全性，管道管理者也可以确定是否需要采取措施来降低风险。

3、QRA 实例

对某天然气长输管道中一段进行 QRA 分析，此段管道长 210km，运行压力 6.4MPa，管径 711mm，前期收集管道属性 77 个，涉及管道本体、运行、环境和维护措施等多个方面。每个属性整理为随着管道里程而变化的格式，根据管道各个属性将此段管道最后分成 241 个管段。计算得到各管段的风险值后，以管道中间的两个站场处为分隔点，将 241 个管段算术平均，合并为 3 个管段。以站场所在点为分隔是因为站场处有收发球筒，方便下一步完整性评价工作（内检测、压力试验等）的进行。合并后，对管段排序，如图 3 所示：

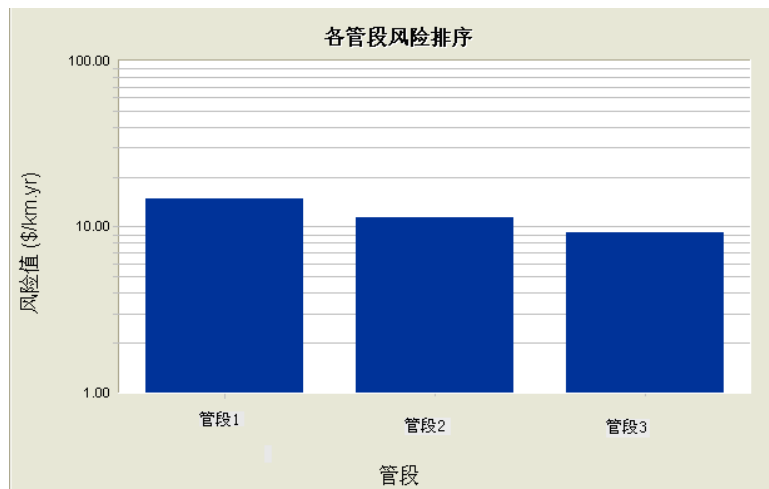


图 3 管段风险排序图

各管段风险值的意义为每年每公里可能的经济损失大小，可与历史状况对比，也可与其他管道对比。管道检测与评价工作应先在高风险段实施，所以建议将来安排检测与完整性评价工作时，优先顺序应分别是管段 1、管段 2，然后才是管段 3。

个人风险值是指个人的年死亡概率，常被用来衡量风险的绝对大小。对管道人口最密集处计算个人风险值，以衡量管道的安全性，得到图 4：

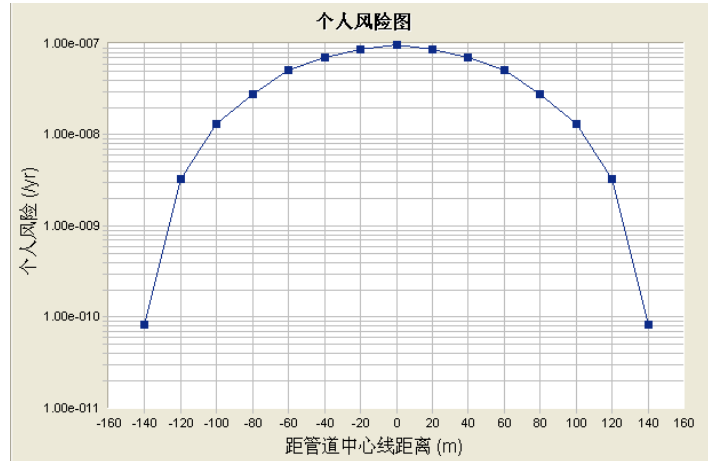


图4 个人风险图

从图4可以看到，在管道正上方，风险最大，具体值为 $9.8 \times 10^{-8}/a$ ，参照国外风险可接受标准，最严格的为英国安全卫生部规定的 $1 \times 10^{-6}/a$ ，所以此天然气管道的风险应是可以接受的。此外 QRA 提供的社会风险值 (FN Curve) 也可作为衡量风险是否可以接受的第二指标。

定量风险的最大好处之一是可以进行风险预测，结合情景分析 (What-If 分析)，实现合理的制定风险控制计划。对此天然气管道风险预测如图5所示，从图中可明显看出风险随着时间变化的增长过程。

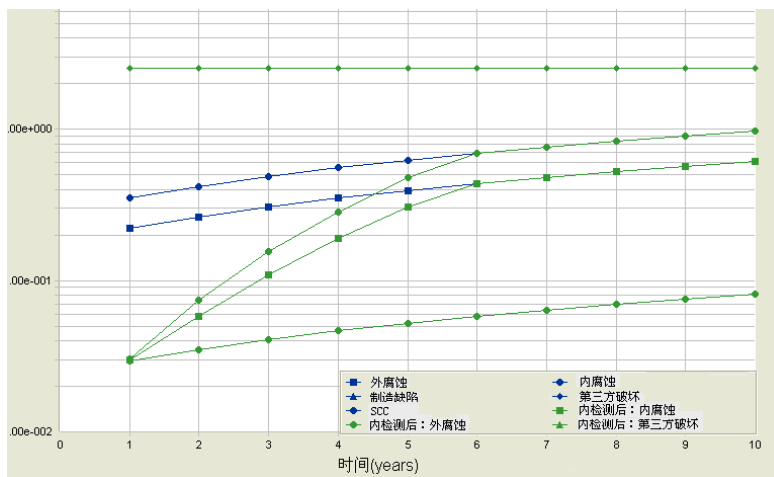


图5 多情景风险预测

从图5可以看出，此管道在6年内风险增长迅速，此后较为平稳。通过仔细分析，发现这是因为这6年是管道上次检测的受益期，所以建议此管道在6年后开始实施下一次检测。

此外，情景分析考虑量化后的经济投入，可以为多方案进行经济性比较，在保障管道安全的前提下，做到最大的投入产出。

4、结论

QRA 是管道风险评价的最新方法，通过本文的分析，主要结论如下：

- 1) QRA 计算推导过程充分借鉴了之前的管道失效历史数据，和已有成熟的经验模型，相比一些定性打分法，更显科学合理；
- 2) 分析过程主要是定量的数值计算，受评价人员的主观判断影响较小，结果统一性好；
- 3) QRA 最后的结果以定量的形式给出，结果有明确的实际意义，便于制定风险可接受标准，判定风险的可接受性；

4) QRA 便于进行情景分析和风险预测, 实现真正的风险管理, 推进管道完整性管理的实施, 保障管道的安全运行。

参考文献:

- [1] 李国兴, 柳岩. 长输天然气管道的安全问题及其对策[J]. 油气储运, 2006, 25(7):52~56
- [2] SteveIrvin[加拿大]. 管道整体系统完整性管理综述[J]. 油气储运, 2005, 24 (增): 144~147
- [3] Managing System integrity of Gas Pipelines[S]. ASME B31.8S, 2001
- [4] W.Kent Muhlbauer[英]. 管道风险管理手册[M] 第二版. 杨嘉瑜译. 北京: 中国石化出版社, 2005
- [5] Patrick L Wickenhauser, David K Playdon. Quantitative pipeline risk assessment and maintenance optimization[J]. The Journal of Pipeline Integrity, 2005, 4: 12-20
- [6] 余建星, 黄振广, 李建辉等, 输油管道风险评估方法中风险分析因素权重调整研究[J]. 中国海上油气(工程), 2001, 13 (5): 41~44
- [7] 彭星煜, 张鹏, 李宗新等. 油气长输管道外腐蚀维护风险缓解程度模型[J]. 石油工业技术监督, 2006, 22 (10): 35~39
- [8] 王心敏, 任彦兵. 天然气管道穿孔和开裂典型事故树分析评价[J]. 石油化工应用, 2006 25 (5) :35~38
- [9] 陈利琼, 张鹏, 梅云新等. 油气管道危害辨识故障树分析方法研究[J]. 油气储运, 2007, 26 (2): 18~50
- [10] 张文艳, 姚安林, 李又绿等. 埋地燃气管道风险程度的多层次模糊评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16 (8): 32~36
- [11] 崔克清. 天然气输送管道泄漏事故危害定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13 (6): 22~24

原发表于《中国安全科学学报》2008.3