

基于失效数据的油气管道定量风险评价方法

帅 健 单 克

中国石油大学（北京）机械与储运工程学院

摘 要 油气管道风险评价作为当前的热点问题，逐渐由定性评价向定量评价过渡。为了减少油气管道定量风险评价过程中主观因素的影响，建立了基于管道失效历史数据的油气管道定量风险评价模型，通过分析美国管道与危险品安全管理局（PHMSA）等数据库的管道分类失效数据，确定了油气管道的基本失效概率与修正因子的指标体系，再根据各个指标量化的难易程度将修正因子分为定量、半定量及定性 3 种类型，其中前两类指标可以量化或量化分级，仅后一类指标依赖于专家的经验判断，大大降低了风险评价的主观依赖性。进一步构建了油气管道风险评价矩阵，用失效概率量化失效可能性，用后果评分量化失效后果的严重程度。最后，将该油气管道定量风险评价方法应用于某输气管线，并绘制“红橙黄蓝”4 色管线风险分布图，识别出该管线的高风险管段。结论认为：①基于管道失效历史数据的风险评价方法能够客观地量化管道的失效概率，准确进行风险分级，有利于实施风险分级管控策略；②建议建立全行业或全国范围的管道失效数据库，以期为基于历史数据的定量风险评价乃至制订风险管控措施提供依据。

关键词 油气管道 定量风险评价 管道失效 历史数据 危害因素 事故统计 修正因子 风险分布图

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.09.017

A quantitative risk assessment method for oil and gas pipelines based on failure data

Shuai Jian & Shan Ke

(College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 9, pp.129-138, 9/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The risk assessment of oil and gas pipeline, one of the current hotspot issues, has gradually evolved from qualitative evaluation to quantitative evaluation. In order to reduce the effects of subjective factors in the process of quantitative risk assessment of oil and gas pipeline, we established a quantitative risk assessment model of oil and gas pipeline based on the historical data of pipeline failure. The index system of basic failure probability and modification factors for oil and gas pipeline was determined by analyzing the failure data of different types of pipelines in the database, such as Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). The modification factors are divided into three groups (i.e., quantitative index, semi-quantitative index and qualitative index) according to the degrees of difficulty in quantifying the modification factors. The first two groups of them can be quantified or quantitatively classified, and only the last one depends on the experience of experts. Thus, the subjective dependence of risk assessment is reduced greatly. Then, the risk evaluation matrix of oil and gas pipeline was constructed, the likelihood of pipeline failure was quantified by using the failure probability, and the severity of the failure consequence was quantified by means of the consequence score. Finally, this quantitative risk assessment method was applied to one gas pipeline system, and a four-color (red, orange, yellow and blue) risk distribution map was plotted to identify the high risk pipe segments. It is included that the risk assessment method based on the historical data of pipeline failures can quantify the failure probability of the pipeline objectively, and classify the risk accurately, which is conducive to the implementation of classification based risk control strategy. It is recommended to create the pipeline failure database in the whole industry or all over the country, so as to provide a basis for the quantitative risk evaluation based on historical data and even for the formulation of risk control measures.

Keywords: Oil and gas pipeline; Quantitative risk assessment; Pipeline failure; Historical data; Hazard factors; Incident statistics; Modification factor; Risk distribution map

基金项目：国家科技支撑计划项目“城镇油气管道安全完整性管理技术方法研究”（编号：2015BAK16B02）、国家重点研发计划项目“油气管道及储运设施完整性评价技术研究”（编号：2016YFC0802105）。

作者简介：帅健，1963 年生，教授，博士生导师；主要从事油气储运安全和管道完整性管理方面的研究工作。地址：（102249）北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学（北京）。ORCID: 0000-0002-6130-4548。E-mail: shuaij@cup.edu.cn

0 引言

管道风险评价的目的在于识别管道危险因素,对整个管道系统的风险值进行评估排序,为制订风险减缓措施、保证管道安全运行提供技术支持。近年来层出不穷的管道事故更加凸显了油气管道风险评价的重要性。

油气管道定量风险评价是管道风险管控的重要技术之一,国内外学者对此均开展了大量的研究^[1-8]。黄小美等^[2]将基于管道失效历史数据的方法与专家判断方法相结合,从中找出这两种方法之间的联系,得到描述其相互关系的方程式。Onisawa^[3]提出了将模糊数(Fuzzy Possibility Score, FPS)转化成模糊概率(Fuzzy Possibility, FP)。Shi等^[4]将层次分析法与模糊综合评价法相结合,用改进后的层次分析法计算专家权重,用模糊综合评价法计算模糊矩阵,从而减小专家评判主观性的影响。Liang等^[5]将故障树分析法与神经网络相结合,对管道第三方破坏进行风险评估和分类。Lam和Zhou^[8]基于数据库,研究美国管道事故关于管径、安装年份、地区等级、失效原因等参数的分布情况,为管道定量风险评价奠

定基础。研究表明,管道失效历史数据对于管道定量风险评价而言,是一项非常重要的基础资料,现在较流行的专家打分法,没有充分利用国内外管道的历史失效数据,评价方法的主观性较强。

基于此,笔者在分析国内外油气管道失效历史数据的基础上,建立基于历史失效数据的油气管道定量风险评价模型,并建立了红橙黄蓝四色风险分级标准,以期减小油气管道定量风险评价过程中主观因素的影响,并进行合理的风险分级。

1 危害因素识别

鱼骨图是一种发现工程系统问题“根本原因”的分析方法。在管道的风险评价过程中,对收集到的管道历史数据进行分析,是对管道风险因素进行合理分类的前提。基于笔者以前对国内油气管道失效原因分类的分析,采用鱼骨图将油气管道事故原因分为腐蚀、第三方破坏、自然力破坏、材料/焊接/装备失效、误操作、其他原因等6大类^[9],每一大类可分为若干小类(图1),该分类也是建立管道定量风险评价指标体系的基础。

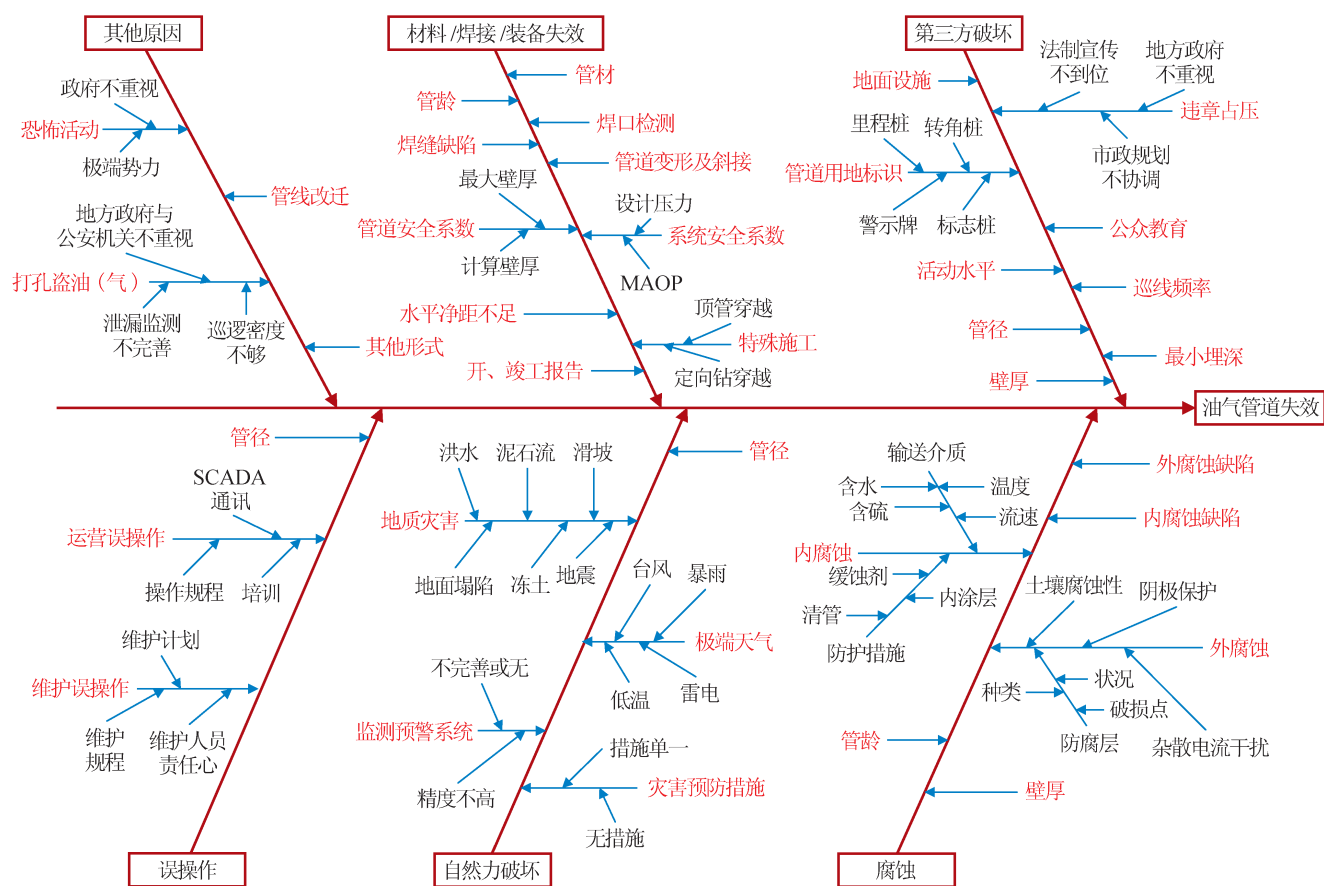


图1 基于鱼骨图法的油气管道危害因素识别图

2 美国油气管道事故分类统计

事故分类统计是得到失效概率的基础，美国是目前世界上管道系统最为完善的国家，通过对美国运输部（Department of Transportation，DOT）下属的管道及危险物品安全管理局（Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration，PHMSA）数据库^[10]的油气管道里程数据、事故数据和失效因素数据进行统计分析，可以得到油气管道的失效概率。

美国每年油气管道的长度变化统计数据如图 2 所示。美国 PHMSA 数据库将管道事故划分为：一般事故、较大事故和重大事故 3 种类型，并且给出每类事故的划分标准^[11]，事故统计数据如图 3 所示，油气管道事故原因比例分布如图 4 所示。

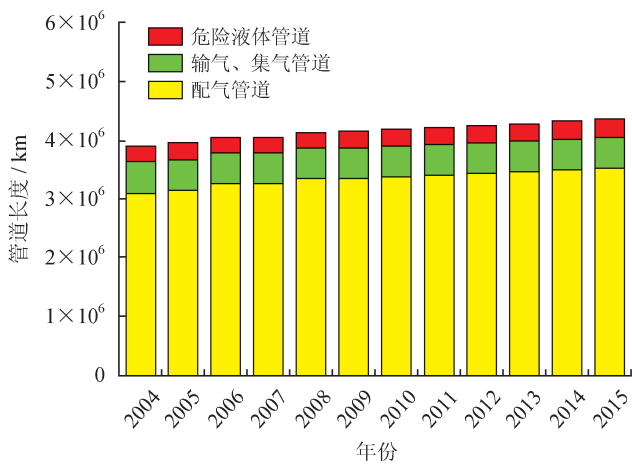


图 2 美国油气管道长度变化统计图

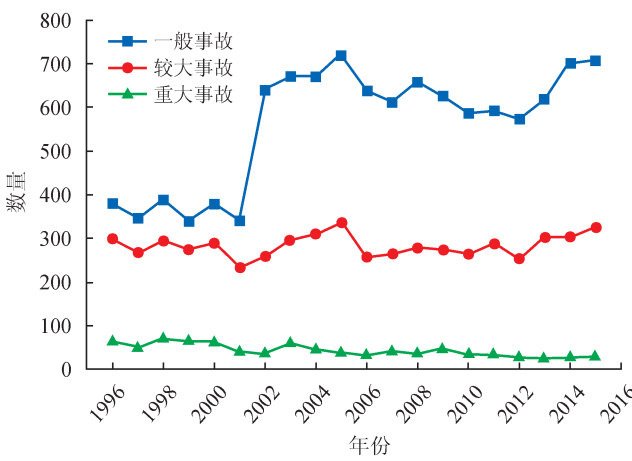


图 3 美国油气管道事故统计图

3 失效概率评估

3.1 评估模型

基于修正因子的油气管道失效概率计算方法如

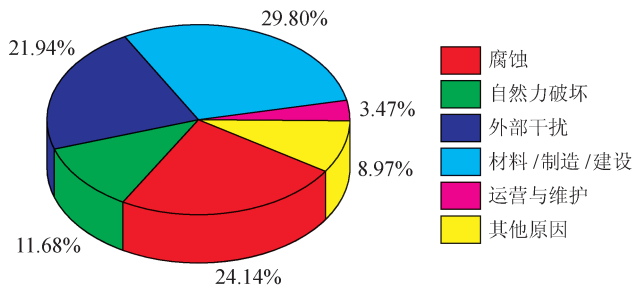


图 4 美国油气管道事故原因比例分布图

式（1）所示。根据统计资料获得由 i 失效因素引起的管道失效概率，将其作为基本失效概率（ R_i ），通过失效概率修正因子（ F_i ）对基本失效概率（ R_i ）进行修正，求得要评价管线由 i 失效因素引起的失效概率。各个因素引起的失效概率相加即得到各段管线的失效概率。评估模型见图 5。

$$P = \sum_{i=1}^l P_i = \sum_{i=1}^l R_i F_i \tag{1}$$

式中 P 表示管道失效概率，次 /（ $\text{km} \cdot \text{a}$ ）； P_i 表示由 i 失效因素引起的失效概率，次 /（ $\text{km} \cdot \text{a}$ ）； R_i 表示失效因素 i 对应的基本失效概率，次 /（ $\text{km} \cdot \text{a}$ ）； F_i 表示失效因素 i 对应的失效概率修正因子； l 表示失效因素的个数，根据前面的分类，此处 $l=6$ 。

3.2 基本失效概率计算

管道基本失效概率也可以理解为平均失效概率，是指某国家或者某企业管道系统平均每年每千米发生的事故数量，反映了管道失效概率的平均状况，可作为管道失效概率评估的基准线。基本失效概率需要通过大量的历史失效数据的统计资料获得，该统计资料来源于管道事故的历史记录，如管道失效数据库。基于历史失效数据的管道某失效因素 i 的基本失效概率（ R_i ）可通过式（2）计算。

$$R_i = \frac{\alpha_i}{m} \sum_{k=1}^m \frac{N_k}{L_k} \tag{2}$$

式中 α_i 表示失效因素 i 所占的比例； m 表示年数； N_k 表示第 k 年管道发生的事故数量； L_k 表示第 k 年的管道长度， km 。

根据前述美国 PHMSA 数据库的油气管道里程数据、事故数据和失效因素数据统计的结果，按照式（2）计算油气管道基本失效概率，计算结果见表 1。

3.3 修正因子指标体系

基本失效概率可以由统计资料获得，但由于统计资料多来源于油气管道事故的历史记录，所以其

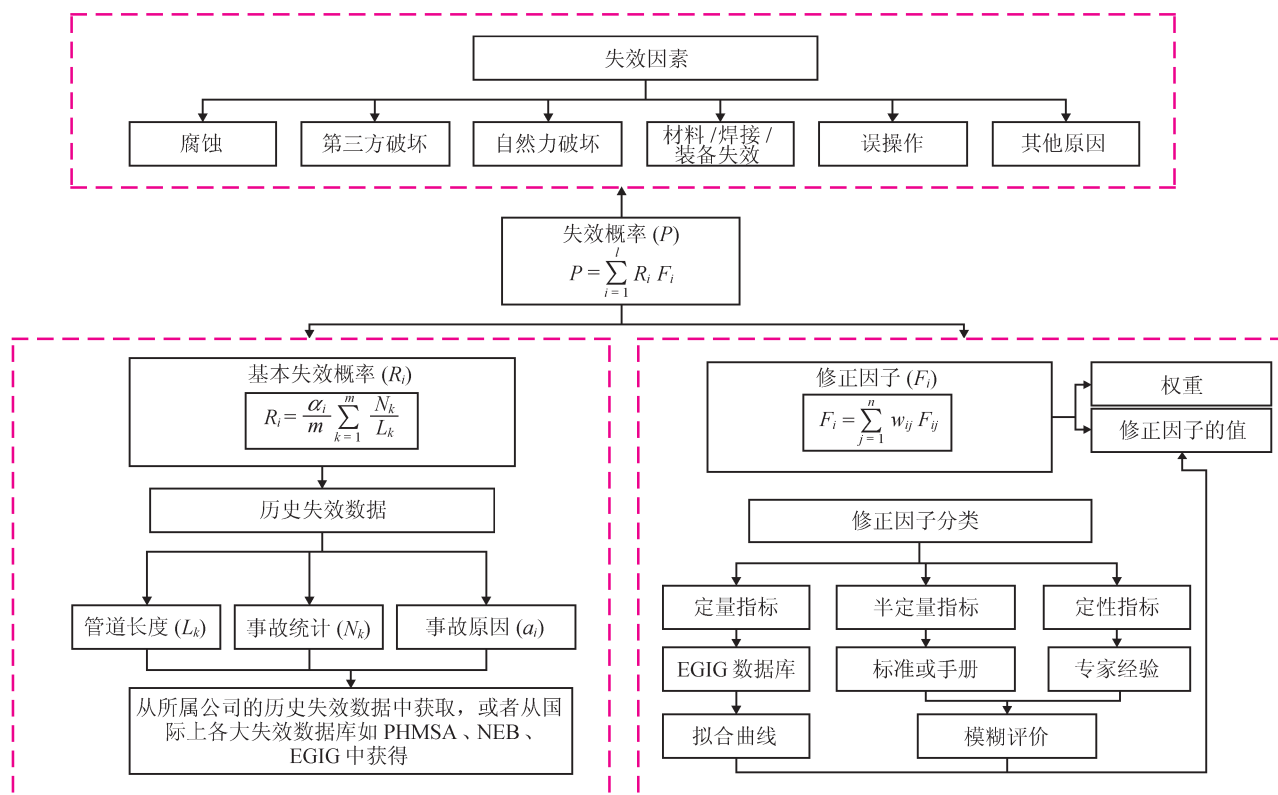


图5 油气管道失效概率评估模型图

表1 油气管道基本失效概率表

失效因素	α_i	$R_i / [次 \cdot (km \cdot a)^{-1}]$
腐蚀	18.23%	2.82×10^{-5}
第三方破坏	21.17%	1.12×10^{-5}
自然力破坏	7.22%	1.76×10^{-5}
材料/焊接/装备失效	37.17%	1.51×10^{-5}
误操作	9.01%	5.75×10^{-5}
其他原因	7.21%	1.39×10^{-5}
合计	100%	1.11×10^{-4}

得出的值只能视为处于平均状态下的管道的失效概率，并不能完全真实地反映特定管道、特定时间、特定运行条件下的失效概率情况，需要通过建立模型对基本失效概率进行修正和更新^[12]。修正因子指标体系由6个一级指标和若干个二级指标组成。一级修正因子指标的值可以根据二级修正因子指标的值与二级指标在一级指标中所占的权重的乘积求得。如下式所示：

$$F_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} F_{ij} \quad (3)$$

式中 F_{ij} 表示二级修正因子指标的值； w_{ij} 表示二级修正因子指标 j 在一级修正因子指标 i 中的权重； n 表

示一级修正因子指标 i 中二级指标的个数。

为了减少风险评价过程中的主观性，尽可能将修正因子指标量化。考虑各个指标获取和量化的难易程度，将修正因子指标划分为3种类型：定量指标、半定量指标以及定性指标。

3.3.1 定量指标

定量指标包括壁厚、管径、管道投产年份、埋深、钢级等参数。通过对欧洲输气管道事故数据组织 (European Gas Pipeline Incident Report Group, EGIG) 的数据库^[13]的数据进行统计分析，拟合得到上述定量指标与失效频率间的函数关系 (图6)。

3.3.2 半定量指标

半定量指标包括土壤腐蚀速率、阴极保护电位、防腐层最大衰减率、杂散电流干扰、管道安全系数、系统安全系数、SCADA 系统可靠度等 (表2)。根据历史失效数据尚不能建立这些指标与失效概率间的函数关系，但是可以参照现行标准或者管理者手册的量化分级标准对半定量指标进行分级。

3.3.3 定性指标

对于定性指标，由于没有确切数据作为支撑，不能量化，并且现行标准或管理手册中也没有相应的检测方法对其进行量化分级，需凭借专家既往经

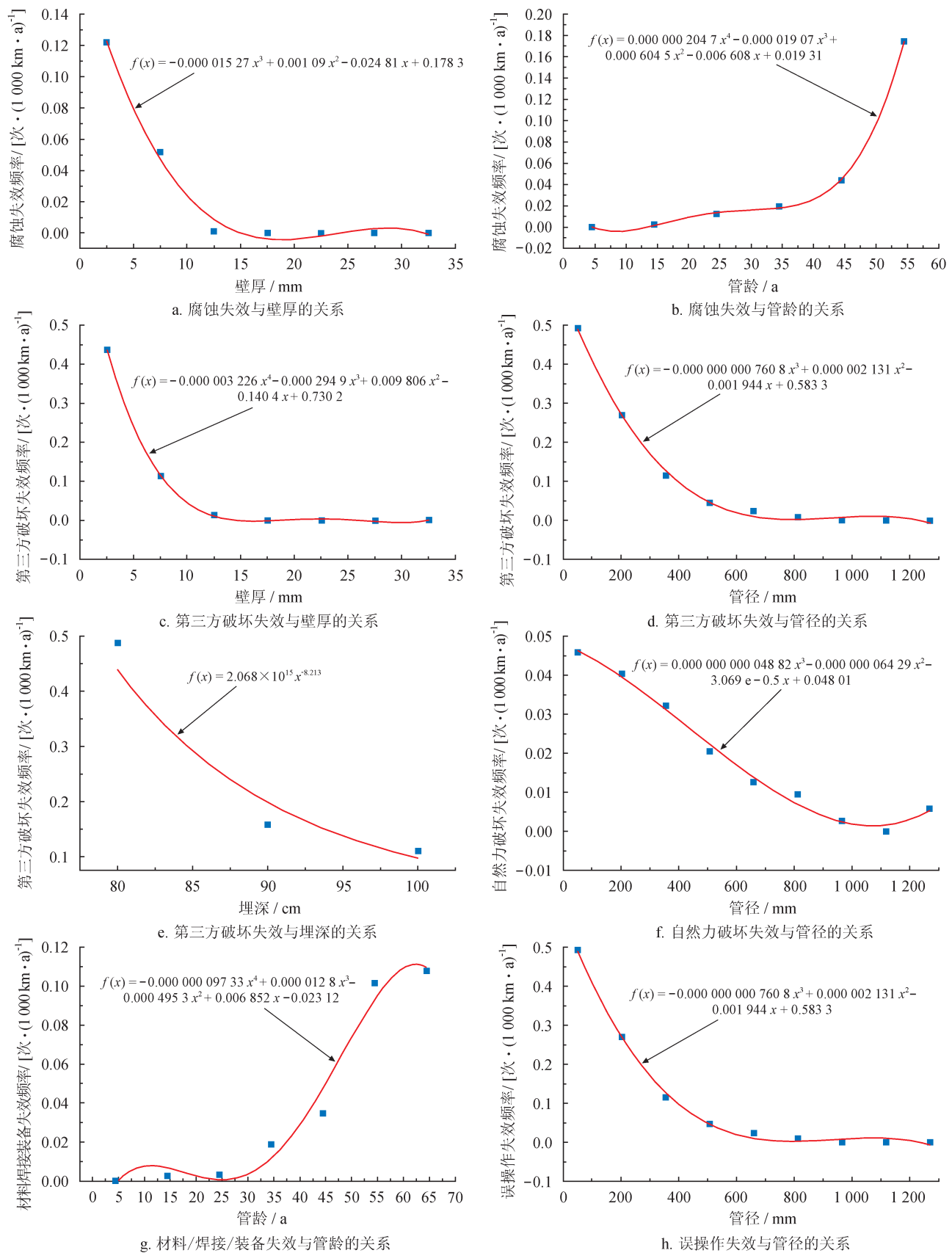


图 6 定量指标与失效频率间的拟合函数图

验判断确定其等级划分准则，定性指标见表 3。

修正因子的取值根据修正因子的等级确定。如

表 2 半定量指标表

一级 指标	二级指标	评判标准	修正因子等级				
			I	II	III	IV	V
腐蚀	土壤腐蚀性	土壤腐蚀性	低	较低	中	较高	高
		土壤电阻率 / ($\Omega \cdot \text{m}$)	> 100	$50 \sim 100$	$20 \sim 50$	< 20	未检测
	阴极保护	阴极保护系统状态	优	良	中	差	劣
		试片断电电位最大值 /V	$-1.00 \sim -0.95$	$-0.95 \sim -0.90$	$-0.90 \sim -0.85$	> -0.85	未检测
	杂散电流干扰	干扰程度	弱	较弱	中	较强	强
		最大管地电位波动值 /mV	< 20	$20 \sim 50$	$50 \sim 350$	> 350	未检测
	防腐层状况	防腐层状况	优	良	中	差	劣
		最大电流衰减率 Y 值 / ($\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$)	$Y \leq 0.02$	$0.02 < Y \leq 0.072$	$0.072 < Y \leq 0.158$	$Y > 0.158$	未检测
	防腐层破损点	最大梯度值 /dB	无破损点	已修复或 无需修复	2 级 (< 40)	3 级 ($40 \sim 60$)	4 级 (> 60) 或 未检测
	外腐蚀缺陷	变形量 (重量百分比)	无缺陷	已修复或 无需修复	2 级	3 级	4 级或未检测
内腐蚀缺陷	变形量 (重量百分比)	无缺陷	已修复或 无需修复	2 级	3 级	4 级或未检测	
	第三方破坏	巡线	巡线频率	每日一巡	两日一巡	三日一巡	四日一巡
材料 / 焊接 / 装备 失效	管道标志	“三桩一牌”完好率	100%	90% $\sim$ 99%	80% $\sim$ 89%	70% $\sim$ 79%	$< 70\%$
	焊口无损检测	无损检测一次合格率	100%	90% $\sim$ 99%	80% $\sim$ 89%	70% $\sim$ 79%	$< 70\%$
	焊缝缺陷	缺陷程度	无异常	已修复或 无需修复	轻度	中度	重度或未检测
	管道变形及斜接	变形量	无	已修复或 无需修复	深度 $< 2\%OD$	2% $OD \leq$ 深度 $< 5\%OD$	深度 $\geq 5\%OD$ 或未检测
	水平净距不足	净距 /m	无	已整改	6.6 $\sim$ 13.5	3.5 $\sim$ 6.5	< 3.5
	管道安全系数	最大壁厚 / 计算壁厚	> 1.40	1.21 $\sim$ 1.40	1.11 $\sim$ 1.20	1.00 $\sim$ 1.10	< 1.00
	系统安全系数	设计压力 / 最大工作压力	> 1.51	1.26 $\sim$ 1.50	1.10 $\sim$ 1.25	1.00 $\sim$ 1.09	< 1.0
误操作	SCADA 系统	可靠度	100%	95%	80%	50%	无 SCADA 系统
	阀室故障	测试合格率	无阀室	100%	$\geq 90\%$	$< 90\%$	未测试

注：1) 土壤电阻率、试片断电电位、杂散电流干扰、防腐层电流衰减率 Y 值等参数参考 GB/T 19285—2014《埋地钢质管道腐蚀防护工程检验》^[14]；2) 水平净距不足参考 GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》^[15]；3) 管道安全系数、系统安全系数、SCADA 系统可靠度参考 KENT 法第三版^[16]；4) OD 表示管道外径

果修正因子处于平均水平，则修正因子取“1”，此时管道系统的失效概率等于基本失效概率。如果修正因子处于较好的水平，则修正因子的取值小于“1”，反之则大于“1”。采用修正因子的方法评估管道失效概率，重点是确定上述提到的“平均水平”。对于定量修正因子指标来说，通过积分中值定理求得拟合函数的平均失效概率，将该平均失效概率视为“平均水平”，每个定量指标对应的失效概率值除以该平均失

效概率即为定量修正因子指标的值。半定量和定性指标修正因子的值可以根据模糊评价法求得，每个等级对应相应模糊数，“I”对应“0.1”，“II”对应“0.3”，“III”对应“0.5”，“IV”对应“0.7”，“V”对应“0.9”，然后利用荷兰学者 Onisawa^[3]提出的经验公式将模糊数转换成模糊概率，同时将等级“III”视为“平均水平”，相应的修正因子取值为“1”，其他4个等级对应的修正因子的值为各个等级对应的模糊概率与等级

表 3 定性指标表

一级指标	二级指标	评判标准	修正因子等级				
			I	II	III	IV	V
腐蚀	内腐蚀防护措施	①内腐蚀监测；②缓蚀剂；③内涂层；④定期清管	四者都有	四者有其三	四者有其二	四者有其一	无任何措施
第三方破坏	活动程度	工地事件	无	1 处	2 处	3 处	4 处及以上
	公众教育	①定期宣传教育；②与当地政 府会晤；③与第三方承包商会 晤；④与附近居民沟通	四者都有	四者有其三	四者有其二	四者有其一	无任何措施
	违章占压	占压情况	无占压	1 处	2 处	3 处	≥ 4 处
	地上设施	①与其他设施距离 6 m 以上； ②有安全防护措施；③重要区 域重点监测	无地上设 施	三者都满足	三者满足其 二	三者满足其 一	无任何措施
自然力破坏	地质灾害敏感点	敏感点稳定及保护情况	无敏感点	存在敏感 点，稳定， 且有保护	存在敏感 点，不稳定， 但有保护	存在敏感 点，稳定， 但无保护	存在敏感 点，不稳定， 且无保护
	防护措施	完善程度	优	良	中	差	劣
材料 / 焊接 / 特殊施工管段 装备失效	顶管、定向钻		无特殊施 工段	1 ~ 2 处	3 ~ 4 处	5 ~ 6 处	≥ 7 处
	开、竣工报告	资料完善程度	优	良	中	差	劣
误操作	员工培训	培训制度完善程度	优	良	中	差	劣
其他原因	其他原因	发生的可能性	很低	低	中等	较高	很高

“III”对应的模糊概率（平均失效概率）的比值。另外，每个二级修正因子指标的权重值为每个指标的平均失效概率除以所有指标的平均失效概率之和。

4 失效后果评估

失效后果评估采用评分模型。用失效后果评分来衡量管道泄漏后果的严重程度，分值越高，说明泄漏后果越严重，风险越高。参考 KENT 法^[18]、GB/T 27512—2011《埋地钢质管道风险评估方法》^[17]、SY/T 6891.1—2012《油气管道风险评价方法 第 1 部分：半定量评价法》^[18]、SY/T 6828—2011《油气管道地质灾害风险管理技术规范》^[19]等方法与标准，建立失效后果评估模型，后果模型总分为 2 500 分。失效后果的计算公式如下：

$$C_{of} = PH \times LV \times DS \times RT \quad (4)$$

式中 C_{of} 表示失效后果总分； PH 表示介质危害性评分； LV 表示泄漏量评分； DS 表示扩散情况评分； RT 表示危害受体评分。

5 风险分级

采用风险矩阵法将油气管道风险分为 4 级，并

用“红橙黄蓝”4 色表示，其目的是对油气管道风险进行分析、排序，确定关注重点和优先级顺序，以便有针对性地做到分级核查、报告、追责和管理。在该风险评价矩阵中，用失效概率量化失效可能性，用后果评分量化失效后果的严重程度，使风险矩阵的各个等级明确化、清晰化。风险评价矩阵见表 4。

6 实例验证

以某管道公司的输气管道为例，进行工程应用示范。该管线沿途经过山地、城镇、工业区、农田等，穿越公路、铁路、河流，全长 69.8 km。管道设计压力为 1.6 MPa，工作压力为 1.4 MPa，输送介质为天然气，管道规格为 $\varnothing 510 \text{ mm} \times 7.9 \text{ mm}$ ，材质为 X52 钢管，防腐层为 3PE 防腐层，于 2010 年 1 月投入使用。

根据该管线的具体情况，结合相关的检测数据，以阀室和敷设环境为划分依据，将该管线划分为 28 段。根据第 3、4、5 节提出的评估方法，得到该管线各段失效概率、失效后果以及风险等级的评价结果（表 5），该管线按里程的风险分布情况见图 7。评价结果显示：该管线的失效概率在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ 次 / ($\text{km} \cdot \text{a}$)，失效可能性为中等偏高，无极高失效可能性管段；其失效后果评分介于 180 ~ 1 500，存

表 4 油气管道安全风险矩阵表

风险评价矩阵			发生的可能性等级（从不可能到频繁发生）				
			1 很低	2 较低	3 中等	4 较高	5 非常高
			$< 10^{-5}$	$[10^{-5}, 10^{-4})$	$[10^{-4}, 10^{-3})$	$[10^{-3}, 10^{-2})$	$\geq 10^{-2}$
事故后果等级 （从轻到重）	1 很小	[0, 500)	1	2	3	4	5
	2 较小	[500, 1000)	2	4	6	8	10
	3 中等	[1 000, 1 500)	3	6	9	12	15
	4 较大	[1 500, 2 000)	4	8	12	16	20
	5 很大	[2 000, 2 500]	5	10	15	20	25

注：1）风险值 = 后果严重性（S）× 发生可能性（L）；2）横轴表示预估潜在后果发生的可能性，分为 5 个级别，分别用 1～5 这 5 个数字来表示事故发生可能性的大小，每个级别对应相应的管道失效概率，属于定量风险评价的范畴。对失效可能性进行等级划分时，按照挪威管道定量风险评价标准 DNV-RP-F107^[20] 进行划分，其划分标准为： $< 10^{-5}$ 为很低可能性， $[10^{-5}, 10^{-4})$ 为较低可能性， $[10^{-4}, 10^{-3})$ 为中等可能性， $[10^{-3}, 10^{-2})$ 为较高可能性， $\geq 10^{-2}$ 为非常高可能性；3）纵轴表示所造成的后果严重程度，将其分为 5 个级别，分别用 1～5 这 5 个数字来表示事故后果的严重性。风险评分介于 0～2 500，按照等分原则对失效后果进行等级划分，划分标准为：[0, 500) 为后果很小，[500, 1 000) 为后果较小，[1 000, 1 500) 为后果中等，[1 500, 2 000) 为后果较大，[2 000, 2 500] 为后果很大；4）当风险值 $\in [20, 25]$ 时属于重大风险（红色）；风险值 $\in [10, 20)$ 时属于较高风险（橙色）；风险值 $\in [5, 10)$ 时属于一般风险（黄色）；风险值 $\in [1, 5)$ 时属于低风险（蓝色），下同

表 5 某管线各段的风险评价结果表

分段	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段	第 6 段	第 7 段
失效概率 / [次 · (km · a) ⁻¹]	3.93×10^{-4}	4.65×10^{-3}	1.96×10^{-3}	3.28×10^{-3}	2.09×10^{-3}	2.28×10^{-3}	6.74×10^{-3}
失效后果评分	1 200	450	840	1 140	180	630	1 200
风险值	9	4	8	12	4	8	12
分段	第 8 段	第 9 段	第 10 段	第 11 段	第 12 段	第 13 段	第 14 段
失效概率 / [次 · (km · a) ⁻¹]	2.91×10^{-3}	5.25×10^{-3}	3.64×10^{-4}	4.51×10^{-3}	3.02×10^{-4}	1.88×10^{-3}	2.15×10^{-3}
失效后果评分	840	420	810	720	270	1 500	360
风险值	8	4	6	8	3	16	3
分段	第 15 段	第 16 段	第 17 段	第 18 段	第 19 段	第 20 段	第 21 段
失效概率 / [次 · (km · a) ⁻¹]	2.50×10^{-4}	5.04×10^{-4}	1.36×10^{-3}	5.06×10^{-4}	2.18×10^{-3}	1.38×10^{-3}	1.95×10^{-3}
失效后果评分	900	270	675	1 200	900	1 500	900
风险值	6	3	8	9	8	16	8
分段	第 22 段	第 23 段	第 24 段	第 25 段	第 26 段	第 27 段	第 28 段
失效概率 / [次 · (km · a) ⁻¹]	1.32×10^{-3}	1.48×10^{-3}	3.23×10^{-4}	1.94×10^{-3}	8.06×10^{-3}	7.06×10^{-3}	5.06×10^{-4}
失效后果评分	600	810	720	1 500	330	2 000	330
风险值	8	8	6	16	4	20	3

在失效后果很大的管段；综合失效概率及失效后果，该管线低风险的管段有 8 段，占总长度的 35.60%，一般风险的管段有 14 段，占总长度的 38.11%，较大风险的管段有 5 段，占总长度的 19.69%，重大风险的管段有 1 段，占总长度的 6.59%。

7 结论与建议

本文建立了基于历史失效数据的油气管道定量风险评价模型，确定了油气管道的基本失效概率与修正因子的指标体系，并以某输气管线为例，对提出的

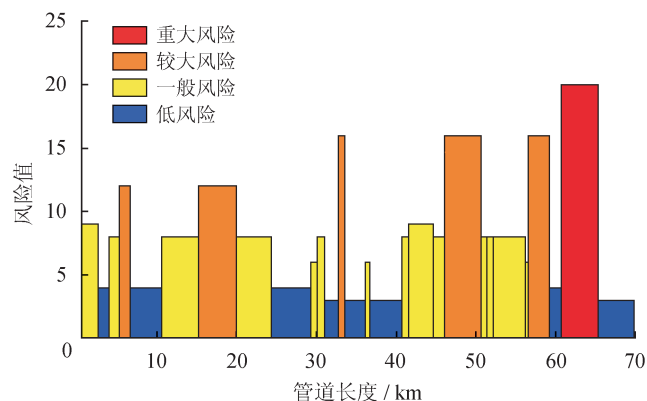


图7 某管道风险等级按管道里程的分布图

风险评价方法与分级标准进行实例验证。通过研究,得到具体结论如下:

1) 根据各个指标量化的难易程度将修正因子分为3类:定量指标、半定量指标、定性指标。定量指标可依靠统计数据进行量化评分,半定量指标参考相关标准或手册的量化检测结果进行等级评定,定量和半定量指标评定中,都不包含主观因素,而定性指标则主要依靠专家经验判断进行等级评定,具有一定的主观依赖性。通过这3类指标的划分,可最大程度地降低风险评价的主观依赖性,增强了风险评价的准确性。

2) 构建了油气管道风险矩阵,用失效概率量化失效可能性,用后果评分量化失效后果的严重程度,绘制“红橙黄蓝”4色管道风险分布图,使各管段的风险等级明确化、清晰化,便于对油气管道实施风险分级管控策略。

3) 实例管线中,低风险管段有8段,占总长度的35.60%,一般风险管段有14段,占总长度的38.11%,较大风险管段有5段,占总长度的19.69%,重大风险管段有1段,占总长度的6.59%。另外,整条管线主要的危害因素为:杂散电流干扰、外防腐层破损、内腐蚀、管道本体缺陷未修复、水平净距不足、个别区段地质灾害敏感。可有针对性地采取风险管控措施,尤其是较大风险和重大风险管段。

4) 与仅仅依靠专家打分的方法相比,笔者提出的基于历史失效数据的方法较为客观。然而,这种基于历史失效数据的风险评价模型的准确性,依赖于管道失效数据的统计分析结果,需要建立全行业范围的油气管道失效数据库,而这恰恰是我国现阶段所缺少的。因此,建议建立全行业或全国范围的管道失效数据库,为基于历史数据的定量风险评价乃至提出风险管控措施提供依据。

参考文献

- [1] 姚安林,周立国,汪龙,王棠昱,李又绿.天然气长输管道地区等级升级管理与风险评价[J].天然气工业,2017,37(1): 124-130.
Yao Anlin, Zhou Ligu, Wang Long, Wang Tangyu & Li Youli. Management of and risk evaluation on long-distance gas pipelines related to regional level upgrading[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 124-130.
- [2] 黄小美,李百战,彭世尼,张家兰.燃气管道失效概率评估方法研究[J].石油学报,2010,31(4): 664-667.
Huang Xiaomei, Li Baizhan, Peng Shini & Zhang Jialan. Assessment methods of failure probability on gas pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 664-667.
- [3] Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 27(2): 87-103.
- [4] Shi Lei, Shuai Jian & Xu Kui. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278: 529-538.
- [5] Liang Wei, Hu Jinqiu, Zhang Laibin, Guo Cunjie & Lin Weipeng. Assessing and classifying risk of pipeline third-party interference based on fault tree and SOM[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(3): 594-608.
- [6] 陈利琼,宋利强,吴世娟,邱星栋,刘琦,夏燕,等.基于有限元方法的滑坡地段输气管道应力分析[J].天然气工业,2017,37(2): 84-91.
Chen Liqiong, Song Liqiang, Wu Shijuan, Qiu Xingdong, Liu Qi, Xia Yan, et al. FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 84-91.
- [7] 青松铸,范小霞,阳梓杰,孙明楠,高健,周秀兰. ASME B31G-2012 标准在含体积型缺陷管道剩余强度评价中的应用研究[J].天然气工业,2016,36(5): 115-121.
Qing Songzhu, Fan Xiaoxia, Yang Zijie, Sun Mingnan, Gao Jian & Zhou Xiulan. Application of ASME B31G-2012 to the residual strength evaluation of pipelines with volumetric defects[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(5): 115-121.
- [8] Lam C & Zhou Wenxing. Statistical analyses of incidents on on-shore gas transmission pipelines based on PHMSA database[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 145: 29-40.
- [9] 狄彦,帅健,王晓霖,石磊.油气管道事故原因分析及分类方法研究[J].中国安全科学学报,2013,23(7): 109-115.
Di Yan, Shuai Jian, Wang Xiaolin & Shi Lei. Study on methods for classifying oil & gas pipeline incidents[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 109-115.
- [10] Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. About data & statistics[EB/OL]. (2017-10-28)[2018-07-11]. <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>.
- [11] 单克,帅健,张思弘.基于修正因子的油气管道失效概率评估

- [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 87-93.
- Shan Ke, Shuai Jian & Zhang Sihong. Adjustment factors based assessment of oil and gas pipelines failure probability[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 87-93.
- [12] Shan Ke & Shuai Jian. Statistical analyses of incidents on oil and gas pipelines based on comparing different pipeline incident databases[C]// Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, 16-20 July 2017, Hawaii, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/PVP2017-65289>.
- [13] European Gas Pipeline Incident Report Group. 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Group 1970-2013[R]. Netherlands: EGIG, 2015.
- [14] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 埋地钢质管道腐蚀防护工程检验: GB/T 19285—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. Inspection of corrosion protection for buried steel pipelines: GB/T 19285-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [15] 中国市政工程华北设计研究院. 城镇燃气设计规范: GB 50028—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- North China Municipal Engineering Design and Research Institute. Code for design of city gas engineering: GB 50028-2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [16] Muhlbauer WK. Pipeline risk management manual: Ideas, techniques, and resources[M]. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004.
- [17] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 埋地钢质管道风险评估方法: GB/T 27512—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. Risk assessment for buried steel pipeline: GB/T 27512-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [18] 国家能源局. 油气管道风险评价方法 第 1 部分: 半定量评价法: SY/T 6891.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- National Energy Administration. Oil & gas pipeline risk assessment methods—Part 1: Semi-quantitative risk assessment method: SY/T 6891.1-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [19] 国家能源局. 油气管道地质灾害风险管理技术规范: SY/T 6828—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Energy Administration. Technical specification for geological hazards risk management of oil and gas pipeline: SY/T 6828-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [20] Det Norske Veritas. Recommended practice DNV-RP-F107, risk assessment of pipeline protection[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010.
- (修改回稿日期 2018-07-09 编辑 罗冬梅)

长庆油田水力喷射多段压裂改造储层连获高产气井

继 2018 年 8 月 5 日中国石油长庆油田公司(以下简称长庆油田)在苏东南区 G11-4 井场经水力喷射 8 段压裂改造, 连获 2 口日产超 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产气井后, 8 月 28 日, 长庆油田采气一厂又在靖 65-37H2 井经水力喷射 9 段压裂改造后, 获日产 $103.283 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产工业气流。长庆油田仅在 8 月份, 就一举获得 3 口高产气井。

伴随国家提出“加快天然气开发”和下游用户对天然气的旺盛需求, 天然气的勘探开发已成为关系国计民生的关键, 对改善国家能源消费结构、保护生态环境起着不可替代的重要作用。长庆油田承担着向京津冀等地近百座大中城市的供气重任, 惠及民众 4 亿多人。据悉, 长庆油田天然气产量约占全国总产量的 1/4, 在全国天然气生产中占有举足轻重的地位。

2018 年年初以来, 长庆油田及时确立了“稳油增气”的战略目标, 并将年产天然气目标追加到 $380 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的历史最高点。为确保这一目标的实现, 长庆油田将今年的天然气产能建设任务提高到 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 目标, 创年度天然气产能建设总量单位历史之最。

负责靖边、榆林、苏里格、子洲、神木、米脂、庆阳、宜黄八大气区九大气田开发的各采气厂, 面对产建任务工作量大、外部环境复杂、老井稳产难等多种不利因素, 持续加大科技创新力度, 靠深化改革解决发展中遇到的问题, 立足年度产气目标, 夺得了一个个气田勘探开发及稳产上产的主动权。

(天工 摘编自《中国石油报》)