

油气管道腐蚀可靠性的贝叶斯评价法^{*}

张 鹏 教授 彭星煜 胡 明

(西南石油大学建筑工程学院, 成都 610500)

学科分类与代码: 620 5020 中图分类号: X937 文献标识码: A

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助 (20060615003);

油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金资助 (PLN0113)。

资助项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目 (2006BAJ16B03); 中国石油科技风险创新研究项目 (050511-5-2)。

【摘 要】 对油气管道腐蚀危害因素进行分析, 建立其失效故障树。根据故障树分析原理, 找出导致管道腐蚀穿孔破坏的 23 个因素。通过对故障树的定性分析, 采用下行法求出油气管道腐蚀失效故障树的 96 个全部最小割集, 并确定失效的主要影响因素。结合最小割集不相交化法和贝叶斯可靠性评定法对管道腐蚀失效进行定量分析, 通过某油气管道事故统计数据, 利用贝叶斯可靠性评定方法求出油气管道腐蚀可靠性的一阶矩和二阶矩。对一阶矩和二阶矩进行拟合, 求出油气管道腐蚀可靠性的第一近似下限和第二近似下限。结果表明: 得出的油气腐蚀管道贝叶斯可靠性评价结果可以指导管道系统的维护和维修, 降低管道运行的风险。

【关键词】 贝叶斯近似评定法; 油气管道; 可靠性; 故障树分析 (FTA); 失效概率

The Reliability Evaluation of Corrosive Oil and Gas Pipeline Based on Bayesian Method

ZHANG Peng Prof PENG Xing-yu HU Ming

(School of Architecture & Civil Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The fault tree for pipeline corrosion was established by analyzing the risk factors affecting the corrosion of oil and gas pipeline. And 23 factors affecting the corrosion of pipeline were determined according to the principle of FTA (fault tree analysis). Then, 96 minimal cut sets (MCS) were calculated out with downward method through qualitative analysis of FTA, and main factors leading to the corrosion failure of pipeline were determined. According to the statistical data of certain oil and gas pipeline accidents, a quantitative analysis was made on the corrosion failure of pipeline by using Bayesian method and non-intersecting method of MCS, and the first moment and the second moment of the pipeline reliability were obtained. Finally, a fitting was conducted on the first moment and the second moment, and the first approximate lower limit and second approximate lower limit for pipeline corrosion reliability were calculated out. The conclusion indicates that the reliability evaluation result of corrosive pipeline based on Bayesian method can guide the maintenance and repair of pipeline system and reduce the risk of pipeline.

Key words: Bayesian method; oil and gas pipeline; reliability; fault tree analysis (FTA); failure probability

^{*} 文章编号: 1003-3033(2008)12-0133-07 收稿日期: 2008-06-05 修稿日期: 2008-11-30

0 引言

我国的绝大多数油气田的开发已 30 年以上, 60%在役管道运行 20 年以上, 进入了“老龄期”, 影响管道腐蚀老化的因素和环境条件趋向恶化。根据调查统计, 大庆油田已建油气管道近 40 000 km。其中, 油管道近 35 000 km, 气管道近 5 000 km。通过对管道穿孔数据统计, 油管道年腐蚀穿孔 2 208 次; 气管道年穿孔 840 次^[1]。大量的管道穿孔, 给油田安全带来危害, 如 2002 年, 萨区洗浴中心地下天然气管线腐蚀泄漏爆炸, 造成 6 人死亡, 5 人重伤。

为了解决油田管道腐蚀造成的安全问题, 需要建立管道腐蚀模型, 计算腐蚀失效概率, 准确预测管道腐蚀失效的发生, 合理地控制管道腐蚀。

目前, 国内对管道腐蚀失效概率的计算常用故障树分析法结合专家判断模糊化方法以及利用金属损失求腐蚀缺陷进而求失效概率的方法。

故障树分析法结合专家判断模糊化方法是先建立管道失效故障树, 然后由专家对影响失效的基本事件进行打分, 最后通过模糊数学方法计算出管道的失效概率^[2-6]。这种方法很大程度上有主观因素存在, 有时不能完全做到客观。

通过腐蚀缺陷求失效概率方法是通过测量腐蚀缺陷深度和腐蚀面积等参数, 利用统计学的方法计算出腐蚀速率进而估算管道的失效概率。这种方法需要测量出管道腐蚀缺陷的数据, 但是往往测量腐蚀缺陷数据是风险控制中较难的过程, 而且这种方法使用经验公式, 不能适合所有管道。

笔者利用贝叶斯可靠性评定法^[7-10]对管道腐蚀失效概率^[11-16]进行预测。这种方法不仅能对管道进行定性分析找出影响管道腐蚀失效的因素, 还能结合统计数据进行客观的定量计算, 求出失效的概率。这种方法利用了贝叶斯统计学的方法, 能够客观真实地描述管道的失效情况。

1 管道腐蚀的故障树

故障树分析法 (FTA, Fault Tree Analysis)是在系统设计过程中, 通过对可能造成系统故障的各种因素进行行分析, 画出逻辑框图 (故障树)从而确定系统故障原因的各种组合方式和发生概率, 并采取相应的改进措施, 是提高系统可靠性的一种设计分析方法。

管道腐蚀常见失效形式为腐蚀穿孔, 选择“管

道腐蚀穿孔”作为顶端事件。而引起管道腐蚀穿孔失效最直接原因就是内腐蚀和外腐蚀, 两个原因中任何一个出现均会导致管道失效。然后再以这两个原因为次顶事件, 继续深入分析, 直到找到代表各种故障事件的基本事件为止, 建立油气管道腐蚀失效故障树, 共有 23 个基本事件。

图 1 为油气管道腐蚀失效的故障树示意图, 表 1 为该故障树对应的事件列表。

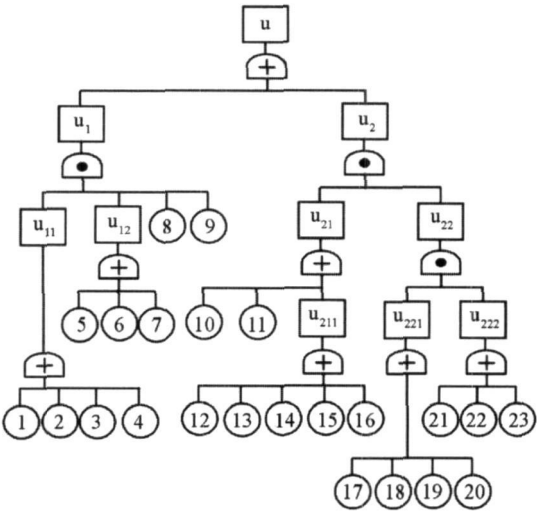


图 1 油气管道腐蚀故障树

表 1 油气管道腐蚀故障树事件表

符号	事件描述	符号	事件描述
u	管道腐蚀失效	8	H ₂ O 含量超标
u ₁	内腐蚀	9	未加缓蚀剂
u ₁₁	酸性介质	10	大量杂散电流干扰
u ₁₂	内保护层失效	11	其他金属埋设物
u ₂	外腐蚀	12	土壤 pH 值低
u ₂₁	腐蚀环境	13	土壤含氧量高
u ₂₁₁	土壤腐蚀性	14	土壤含盐量高
u ₂₂	保护系统失效	15	土壤存在还原菌
u ₂₂₁	防腐层失效	16	土壤含水量大
u ₂₂₂	阴极保护失效	17	外力损伤防腐层
1	H ₂ S 含量超标	18	防腐层补口不合格
2	SO ₂ 含量超标	19	防腐层施工质量差
3	CO ₂ 含量超标	20	防腐层选型不当
4	其他酸性气体	21	阴极保护不足
5	无内涂层	22	停电中断
6	清管效果差	23	发生屏蔽
7	内涂层破损		

2 管道故障树的定性分析

通过管道故障树定性分析可以找出引起管道腐蚀失效的主要因素, 利用下行法分析建立的油气管

道腐蚀故障树,得出引起管道腐蚀失效因素的割集,把所得到故障树的割集再利用集合运算规则(布尔代数定型)加以简化、吸收,则得到全部最小割集。腐蚀失效故障树分析得出 96个最小割集(见表 2)。

表 2 失效故障树最小割集表

编号	最小割集	编号	最小割集
K1	16 20 23 24	K49	28 32 36
K2	16 21 23 24	K50	28 32 37
K3	16 22 23 24	K51	28 32 38
K4	17 20 23 24	K52	28 33 36
K5	17 21 23 24	K53	28 33 37
K6	17 22 23 24	K54	28 33 38
K7	18 20 23 24	K55	28 34 36
K8	18 21 23 24	K56	28 34 37
K9	18 22 23 24	K57	28 34 38
K10	19 20 23 24	K58	28 35 36
K11	19 21 23 24	K59	28 35 37
K12	19 22 23 24	K60	28 35 38
K13	25 32 36	K61	29 32 36
K14	25 32 37	K62	29 32 37
K15	25 32 38	K63	29 32 38
K16	25 33 36	K64	29 33 36
K17	25 33 37	K65	29 33 37
K18	25 33 38	K66	29 33 38
K19	25 34 36	K67	29 34 36
K20	25 34 37	K68	29 34 37
K21	25 34 38	K69	29 34 38
K22	25 35 36	K70	29 35 36
K23	25 35 37	K71	29 35 37
K24	25 35 38	K72	29 35 38
K25	26 32 36	K73	30 32 36
K26	26 32 37	K74	30 32 37
K27	26 32 38	K75	30 32 38
K28	26 33 36	K76	30 33 36
K29	26 33 37	K77	30 33 37
K30	26 33 38	K78	30 33 38
K31	26 34 36	K79	30 34 36
K32	26 34 37	K80	30 34 37
K33	26 34 38	K81	30 34 38
K34	26 35 36	K82	30 35 36
K35	26 35 37	K83	30 35 37
K36	26 35 38	K84	30 35 38
K37	27 32 36	K85	31 32 36
K38	27 32 37	K86	31 32 37
K39	27 32 38	K87	31 32 38
K40	27 33 36	K88	31 33 36
K41	27 33 37	K89	31 33 37
K42	27 33 38	K90	31 33 38
K43	27 34 36	K91	31 34 36
K44	27 34 37	K92	31 34 37
K45	27 34 38	K93	31 34 38
K46	27 35 36	K94	31 35 36
K47	27 35 37	K95	31 35 37
K48	27 35 38	K96	31 35 38

分析表 2中的最小割集可以看出。腐蚀穿孔包括外腐蚀、内腐蚀两个方面。内腐蚀主要由天然气中的硫化物酸性介质和内防腐层失效引起。严重腐蚀将导致防腐绝缘涂层失效、管壁减薄、管线穿孔,甚至发生管线开裂。控制管道内腐蚀的产生可以从以下几个方面入手:

1)控制管输介质的质量,严格控制管道中的酸性介质的气体含量;

2)增加管道内防腐质量,选择合理的防腐材料,保护管道内防腐层,对管道进行实时监控。

外腐蚀的主要影响因素是土壤腐蚀、防腐绝缘涂层失效、阴极保护失效等。控制管道外腐蚀产生可以从以下几个方面入手:

1)合理选择管道材料,深埋地下的管道,由于所处土壤环境的不可避免,所以只有从材料抗蚀性着手,采用耐腐蚀和高强度的钢材,针对不同的土壤特性采用不同的材料。

2)涂层和阴极保护联合防护,在金属管道的表面施加保护层是防止土壤腐蚀的重要方法。采用涂层保护可以有效地阻碍土壤介质对管材的腐蚀作用。目前常用的防腐材料和涂层主要有:石油沥青、环氧煤沥青、环氧粉末树脂等。

3)加强管道维护管理和监测,防止外力对管道防护层和阴极保护系统的破坏;阴极保护系统必须定期测量和核实参数是否符合使用要求,保证管道的正常安全运行。

3 油气管道贝叶斯可靠性评价

首先根据统计数据,利用腐蚀因素的可靠度函数(可靠度函数一般为指数分布、正态分布、β分布、负对数 Γ分布等),并根据这些分布的函数求出各个失效因素可靠度的一阶矩 $\mu_i = E(R_i)$ (分布均值)和二阶矩 $\nu_i = E(R_i^2)$ (分布方差)。

通过建立的故障树,采用最小割集求顶事件发生的概率(不可靠度)。通过前面分析可以得出故障树有 96个最小割集,系统故障事件的故障树结构函数表示如下:

$$\overline{T} = \Phi(X) = K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_{96} \tag{1}$$

式中,每个最小割集 $K_i (1 \leq i \leq 96)$ 是底事件 $x_i (1 \leq i \leq n)$ 为底事件数目)的积事件。

一般情况下,最小割集彼此相交,根据相容事件的概率计算公式,顶事件发生概率为 $P(T)$,即系统不可靠度 F 则:

$$F=P(T)=P(K_1\cup K_2\cup \dots \cup K_k)=\sum_{i=1}^k P(K_i)-\sum_{i<j\leq 2} P(K_iK_j)+\sum_{i<j\leq 3} P(K_iK_jK_i)+\dots +(-1)^{k-1} P(K_1K_2\dots K_k) \tag{2}$$

上式有 2^k-1 项, 每一项为多事件的连乘积, 计算量大, 可能会产生组合爆炸。解决这一问题的有效方法是把最小割集的相交和, 通过不交化方法变成不交和, 再求事件发生概率^[17-19]。

不交化计算时, 经常采用以下集合运算则:

$$K_1\cup K_2\cup \dots \cup K_k=K_1+\overline{K_1}K_2+\overline{K_1}\overline{K_2}K_3+\dots +\overline{K_1}\overline{K_2}\dots \overline{K_{k-1}}K_k \tag{3}$$

$$\overline{K_1}\overline{K_2}\dots \overline{K_k}=\overline{K_1}+\overline{K_1}K_2+\overline{K_1}K_2\overline{K_3}+\dots +K_1K_2\dots K_{k-1}\overline{K_k} \tag{4}$$

利用最小割集计算腐蚀管道可靠度的一阶矩和二阶矩。故障树分析中, 底事件习惯上采用故障树事件表示, 任意第 i 个故障树事件为 $\overline{x_i}$ (即第 i 个底事件), 任意第 i 个故障事件 $\overline{x_i}$ 对应的第 i 个正常事件表示为 x_i (即为 $\overline{x_i}$ 的逆事件)。

任意第 i 个正常事件发生的概率为可靠度 R_i (即第 i 个故障树事件不发生的概率), 第 i 个正常事件不发生的概率为不可靠度 F_i (即第 i 个故障事件发生的概率)。

设通过可靠性试验, 已知任意第 i 个正常事件发生的概率的一阶矩 $E(R_i)$ 和二阶矩 $E(R_i^2)$, 则可靠性评定需要的其他阶矩分别如下:

$$E(F_i)=1-E(R_i) \tag{5}$$

$$E(R_i^2)=E[(1-F_i)^2]=1-2E(F_i)+E(F_i^2) \tag{6}$$

$$E(R_iF_i)=E[R_i(1-R_i)]=E(R_i)-E(R_i^2) \tag{7}$$

计算系统可靠度一阶矩过程计算方法如下:

首先, 将系统的 k 个最小割集 $K_i (1\leq i\leq k)$ 进行不交化处理, 得到不交化表达式。

其次, 如果表达式 T 中有第 i 个正常事件表示为 x_i 则在式 (1) 中代入 $E(R_i)$; 如果式 (1) 中有 i 个故障树事件为 $\overline{x_i}$ 则在式 (1) 中代入 $E(F_i)=1-E(R_i)$ 。

最后, 各项求和得到不可靠度的一阶矩 $E(R)$ 。则故障树结构函数的不交型表达式如下:

$$T=K_1\cup K_2\cup \dots \cup K_k=K_1+\overline{K_1}K_2+\overline{K_1}\overline{K_2}K_3+\dots +\overline{K_1}\overline{K_2}\dots \overline{K_{k-1}}K_k \tag{8}$$

计算系统可靠度二阶矩过程计算方法如下:

1) 将系统的 k 个最小割集 $K_i (1\leq i\leq k)$ 进行

不交化处理, 得到不交化表达式 T 并且进一步计算其平方表达式 T^2 。

2) 若表达式 T 有第 i 个正常事件表为 x_i 则式 T^2 中代入 $E(R_i)$; 若式 T^2 中有 i 个故障树事件为 $\overline{x_i}$ 则在表达式 T^2 中代入 $E(F_i)=1-E(R_i)$ 。若表达式 T^2 中有第 i 个正常事件表示为的二次方 x_i^2 则在表达式 T^2 中代入 $E(R_i^2)$; 如果表达式 T^2 中有 i 个故障树事件为 $\overline{x_i}$ 的二次方, 则在表达式 T^2 中代入式 (6)。如果表达式 T^2 中有事件为 $\overline{x_i}x_i$ 则在表达式 T^2 中代入式 (7) 中。

(3) 各项求和得到不可靠度的二阶矩 $E(F^2)$ 。

(4) 采用最小割集不交化方法求得故障树系统的不可靠度一阶矩 $E(F_i)$ 和二阶矩 $E(F^2)$, 再转化为故障树系统可靠度一阶矩 $E(R_i)$ 和二阶矩 $E(R^2)$ 为

$$E(R)=1-E(F) \tag{9}$$

$$E(R^2)=E[(1-F)^2]=1-2E(F)+E(F^2) \tag{10}$$

故障树顶事件平方表达式 T^2 如下:

$$T^2=(K_1+\overline{K_1}K_2+\overline{K_1}\overline{K_2}K_3+\dots +\overline{K_1}\overline{K_2}\dots \overline{K_{k-1}}K_k)\times (K_1+\overline{K_1}K_2+\overline{K_1}\overline{K_2}K_3+\dots +\overline{K_1}\overline{K_2}\dots \overline{K_{k-1}}K_k) \tag{11}$$

把各个失效因素的一阶矩 $\mu_i=E(R_i)$ 代入式 (8) 后, 即可计算油气管道腐蚀可靠度的一阶矩 $\mu=E(R)$; 把各个失效因素的一阶矩 $\mu_i=E(R_i)$ 和二阶矩 $\nu_i=E(R_i^2)$ 代入式 (11) 中, 即可求出腐蚀管道的二阶矩 $\nu=E(R^2)$ 。

用 β 分布函数拟合腐蚀管道可靠度函数:

$$f(x;s,f)=\beta(x;s,f)=\frac{1}{B(s,f)}x^{s-1}(1-x)^{f-1} \tag{12}$$

$$B(s,f)=\int_0^1 x^{s-1}(1-x)^{f-1}dx \tag{13}$$

β 分布的 k 阶矩如下:

$$E(X^k)=\int_0^1 \frac{x^k}{B(s,f)}x^{s-1}(1-x)^{f-1}dx \tag{14}$$

则可求出腐蚀管道的一阶矩和二阶矩得:

$$\int_0^1 Rf(R;s,f)dR=\frac{s}{n}=\mu \tag{15}$$

$$\int_0^1 R^2f(R;s,f)dR=\frac{s(s+1)}{n(n+1)}=\nu \tag{16}$$

式中, s ——检测腐蚀管道完好的次数;
 f ——检测腐蚀管道失效的次数;
 n ——检测管道总次数, $n=s+f$
求解式 (15) 和式 (16) 得:

$$n=\frac{\mu-v}{v-\mu^2}$$

(17)

$$\hat{\mu}=n(1-\mu)$$

(18)

经定置信度 γ 的可靠度下限 R_{LB} 解得:

$$\int_0^{R_{LB}} f(R|s) dR=I_{LB}(s) \hat{s}=1-\gamma$$

(19)

式中, $I(\cdot, \cdot)$ ——不完全 β 分布函数;
 R_{LB} ——贝叶斯评定法第一近似下限^[13], 它是不完全 β 分布函数的 $1-\gamma$ 下侧分位数。

如果用负对数 Γ 分布函数来拟合系统的可靠度函数, 即:

$$f(x)=L\Gamma(x|z,\eta)=\frac{\eta^z}{\Gamma(z)}x^{z-1}(-\ln x)^{z-1}$$

(20)

负对数 Γ 分布的 k 阶矩如下:

$$E(X^k)=\int_0^1\frac{\eta^z}{\Gamma(z)}x^{k+z-1}(-\ln x)^{z-1}dx$$

(21)

则可求出腐蚀管道的一阶矩和二阶矩得:

$$\int_0^1R\cdot L\Gamma(R|,z,\eta) dR=\left(\frac{\eta}{\eta+1}\right)^z=\mu$$

(22)

$$\int_0^1R^2\cdot L\Gamma(R|,z,\eta) dR=\left(\frac{\eta}{\eta+1}\right)^z=\nu$$

(23)

式中, z ——检测腐蚀管道失效的次数;
 η ——检测腐蚀管道总次数。

求解式 (22 和式 (23 得:

$$\ln\left(\frac{\eta+1}{\eta}\right)/\ln\left(\frac{\eta+2}{\eta+1}\right)=-\frac{\ln\mu}{\ln(\mu/\nu)}$$

(24)

$$z=-\frac{\ln\mu}{\ln\left(\frac{\eta+1}{\eta}\right)}$$

(25)

式中, η 的求解需要解非线性方程, 设置信度为 γ , 可以求出可靠度下限 R_{LB} 解得:

$$\int_{R_{LB}}^1 L\Gamma(R|,z,\eta) dR=\frac{1}{\Gamma(z)}\int_{\ln R_{LB}}^{\ln 1}y^{z-1}e^y dy=$$

$$I_{\eta \ln R_{LB}}(z)=\gamma$$

(26)

式中, $I(\cdot)$ ——不完全 Γ 分布函数;
 R_{LB} ——贝叶斯评定法第二近似下限;
 $-\eta \ln R_{LB}$ ——不完全 Γ 分布函数的 γ 下侧分位数。

通过分析可知, 如果腐蚀管道的可靠度用 β 分布函数来拟合, 得到的是贝叶斯评定方法的可靠度第一近似下限, 如果腐蚀管道的可靠度函数用负对数 Γ 分布函数来拟合, 得到的是贝叶斯评定方法的可靠度第二近似下限, 评价流程如图 2 所示。

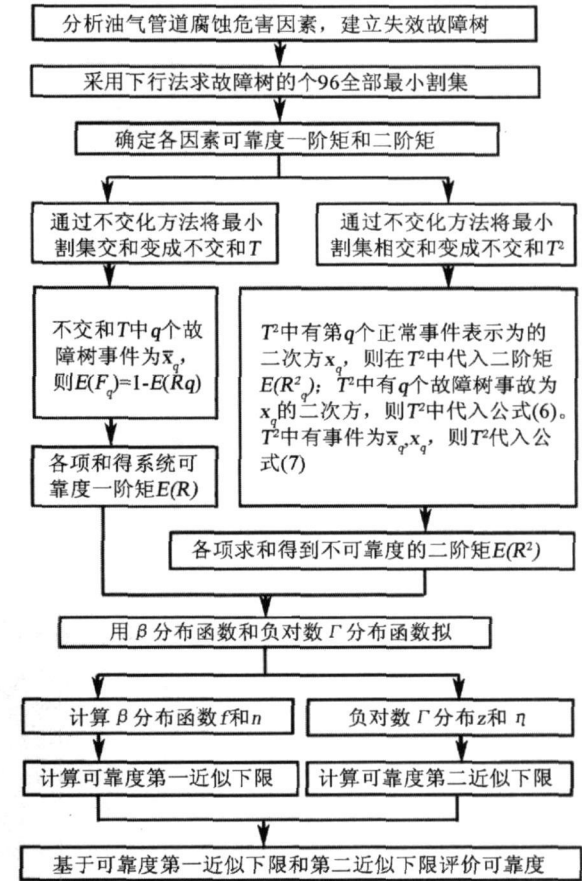


图 2 基于贝叶斯方法可靠性评价流程图

4 算例分析

以某管道为例^[20], 计算腐蚀故障树顶事件“腐蚀穿孔”的失效概率。表 3 列出了某管道所有腐蚀因素的历史统计数据, 包括检测次数和失效次数。

表 3 油气管道腐蚀因素统计

符号	基本事件	不合格数	检查总数
x ₁	H ₂ S 含量超标	2 次	155 次
x ₂	SO ₂ 含量超标	1 次	155 次
x ₃	CO ₂ 含量超标	3 次	155 次
x ₄	其他酸性气体	2 次	155 次
x ₅	无内涂层	3 次	140 次
x ₆	清管效果差	9 次	134 条
x ₇	内涂层破损	8 次	134 次
x ₈	H ₂ O 含量超标	4 次	155 次
x ₉	未加缓蚀剂	3 次	134 次
x ₁₀	存在大量杂散电流	4 处	142 处
x ₁₁	其他金属埋设物	2 处	142 处
x ₁₂	土壤 pH 值低	3 处	142 处
x ₁₃	土壤含氧量高	2 处	142 处
x ₁₄	土壤含盐量高	3 处	142 处
x ₁₅	土壤存在还原菌	2 处	142 处

续表

符号	基本事件	不合格数	检查总数
x ₁₆	土壤含水量大	21 处	142 处
x ₁₇	外力损伤防腐层	3 处	140 处
x ₁₈	防腐层补口不合格	4 处	140 处
x ₁₉	防腐层施工质量差	2 处	140 处
x ₂₀	防腐层设计选型不当	1 处	140 处
x ₂₁	阴极保护不足	3 处	134 处
x ₂₂	停电中断	1 次	110 次
x ₂₃	发生屏蔽	2 处	110 处

对上面 23 个因素逐一分析, 因为腐蚀管道的各因素为成败型形式, 即为 β 分布函数。利用贝叶斯可靠性近似评定法求出各个失效因素的一阶矩和二阶矩, 如表 4 所示。

表 4 腐蚀各因素一阶矩和二阶矩

因素符号	概率符号	$E(R)$	$E(R^2)$
x ₁	q ₁	0.987 220 6	0.974 684 6
x ₂	q ₂	0.993 589 8	0.987 261 2
x ₃	q ₃	0.980 892 2	0.962 268 2
x ₄	q ₄	0.987 220 6	0.974 684 6
x ₅	q ₅	0.978 874 0	0.958 338 8
x ₆	q ₆	0.935 274 9	0.875 171 2
x ₇	q ₇	0.942 254 5	0.888 233 4
x ₈	q ₈	0.974 604 5	0.950 010 0
x ₉	q ₉	0.977 942 0	0.956 527 9
x ₁₀	q ₁₀	0.972 320 0	0.945 591 2
x ₁₁	q ₁₁	0.986 062 9	0.972 415 1
x ₁₂	q ₁₂	0.979 167 3	0.958 909 3
x ₁₃	q ₁₃	0.986 062 9	0.972 415 1
x ₁₄	q ₁₄	0.979 167 3	0.958 909 3
x ₁₅	q ₁₅	0.986 062 9	0.972 415 1
x ₁₆	q ₁₆	0.862 975 5	0.745 491 9
x ₁₇	q ₁₇	0.978 874 0	0.958 338 8
x ₁₈	q ₁₈	0.971 931 6	0.944 841 1
x ₁₉	q ₁₉	0.985 865 9	0.972 029 4
x ₂₀	q ₂₀	0.978 874 0	0.958 338 8
x ₂₁	q ₂₁	0.992 907 8	0.985 915 5
x ₂₂	q ₂₂	0.990 991 0	0.982 142 9
x ₂₃	q ₂₃	0.982 063 1	0.964 604 6

把各个失效因素的一阶矩代入式 (8), 进行不交化处理后, 应用贝叶斯近似评定法可以求出油气管道腐蚀可靠性的一阶矩:

$E(R)=0.999\ 236\ 7$

把各个失效因素的一阶矩和二阶矩代入式 (11), 采用最小割集不交化方法处理计算, 运用笔者的可靠性评定方法, 并进行编程计算, 求得系统可靠度的二阶矩如下:

$E(R^2)=0.998\ 480\ 3$

把腐蚀管道的一阶矩和二阶矩进行函数拟合, 拟合为成败型时, 腐蚀管道失效的次数为 r , 总数为 n , 根据式 (17) 和式 (18) 计算:

$f=1.144\ 950\ 0\ n=359.926\ 582\ 1$

当腐蚀管道等效为指数型时, 腐蚀管道失效的次数为 r , 总数为 n , 根据式 (24) 和式 (25) 可解得:

$z=1.143\ 841\ 3\ \eta=357.542\ 024\ 7$

把求出的成败型拟合结果腐蚀管道失效的次数为 r , 总数为 n 代入式 (17); 指数型拟合结果腐蚀管道失效的次数为 r , 总数为 n 代入式 (24), 设定置信度 γ , 求腐蚀管道可靠度下限, 即贝叶斯评定方法的第一和第二近似下限, 分别设置信度 γ 的取值分别为 $\gamma=0.7\ \gamma=0.8\ \gamma=0.9\ \gamma=0.95$ 并求取腐蚀管道的可靠性近似下限, 如表 5 所示。

表 5 管道系统可靠度下限

置信度	第一近似下限	第二近似下限
0.7	0.996 651 9	0.994 013 5
0.8	0.995 523 0	0.992 215 8
0.9	0.993 606 6	0.989 541 2
0.95	0.991 690 1	0.988 065 7

5 结 论

1) 采用故障树分析法, 建立油气管道腐蚀失效故障树, 对影响管道腐蚀失效因素进行定性分析, 提出了减小管道腐蚀失效概率的一些措施, 并找出所有最小割集。

2) 结合管道历史数据, 分别求出引起管道失效各因素的一阶矩和二阶矩。再利用故障树求取的最小割集和各失效因素的一阶矩和二阶矩, 结合贝叶斯可靠性评定法求管道腐蚀失效的一阶矩和二阶矩。对系统失效的一阶矩和二阶矩进行拟合, 求出可靠度的近似下限。

3) 进行系统可靠性评定时, 其关键是计算系统可靠度的一阶矩和二阶矩, 采用故障树分析方法进行可靠性评定时, 使用不交化方法就可求得系统可靠度的一阶矩和二阶矩, 相比常规金字塔式可靠性评定方法, 避免了计算系统可靠度的表达式, 计算过程更简单。

4) 采用故障树分析方法进行可靠性评定时, 将系统故障的各种原因, 由总体至部分, 按树枝状结构, 自上而下逐层细化的分析方法, 不仅可进行可靠性评定, 而且还可通过对系统故障树的建立, 明确系

统失效的各种直接与间接原因,有助于设计人员全面了解系统的各种故障。

程应用中证明,具有更方便、更直观、用处更广泛的特点。

5) 基于故障树的贝叶其可靠性评定方法在工

参 考 文 献

- [1] 张占奎. 油气管道腐蚀失效预测及安全可靠性评估研究[D]. 天津: 天津大学[硕士学位论文], 2006
- [2] 陈利琼, 张鹏, 梅云新. 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): 18~30
- [3] K ilyo p K in, SangHoonHan. A fastmethod of findingminimal cutsets in a risk monitor[J]. Reliability Engineering and System Safety 1998 62 17~21
- [4] 喻西崇, 赵金洲, 安维杰等. 腐蚀管道的可靠度分析方法研究[J]. 力学与实践, 2004 26(1): 45~48
- [5] 彭星煜, 张鹏, 李宗新. 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
- [6] 赵新伟, 李鹤林, 罗金恒等. 油气管道完整性管理技术及其进展[J]. 中国安全科学学报, 2006 16(1): 129~135
- [7] 宋保维, 毛昭勇, 王雯琴. 基于故障树分析的鱼雷可靠性评定方法[J]. 系统仿真学报, 2007 19(10): 2180~2182
- [8] 金星. 发射场供电系统可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2003 25(1): 119~121
- [9] 常宝娴. 含桥联复杂系统的 Bayesian 可靠性分析及 Bayesian 统计决策问题中的几个结论[D]. 南京: 南京理工大学[硕士学位论文], 2006
- [10] 金星, 洪延姬. 系统可靠性评定方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [11] 赵晓冬. 埋地天然气管道腐蚀问题的解决[J]. 石油化工应用, 2007 26(4): 57~59
- [12] O la H Bjornoyet. Risk based inspection Principles and their application to corroded Pipelines[J]. Pipes and Pipelines International 2001 46(5): 12~16
- [13] 王海秋, 张昌兴. 油气管道腐蚀失效概率统计及预测模型[J]. 油气田地面工程, 2007 26(4): 14~15
- [14] Zhang Peng, Chen Lihong, Hou Xiangqin. Utility function method of optimal decision risk based for oil/gas Pipeline integrity maintenance[A]. Papers of 2005 China International Oil & Gas Pipeline Technology (Integrity) Conference[C], 2005 9 163~174
- [15] 黄金营, 刘强, 郭远明等. 油气集输管道腐蚀失效分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2007 24(2): 57~59
- [16] 赵雪娥, 蒋军成. 原油储罐的腐蚀机理研究及防护技术现状[J]. 中国安全科学学报, 2005 15(3): 104~107
- [17] 张文华, 张凤鸣, 惠晓滨. 由不交化矩阵求最小割集的改进算法[J]. 计算机工程与设计, 2005 26(10): 2749~2751
- [18] Dr Francisco Calvo, Dr Jose Manuel Hallen, Dr Jorge Luis Gonzalez. A reliability-based approach for the condition assessment of corroding Pipelines[A]. The Pipeline PEGging Integrity Assessment and Repair Conference[C], 2004 2 1~14
- [19] Andrew Francis Tim Illsop, M A McCallum & M McQueen. A robust approach to Pipeline integrity management using direct assessment based on structural reliability analysis[A]. Proceedings of Corrosion 2004 Conference[C], 2004 04196
- [20] David Beger. Large IDC runs rigorous external coating defect assessment process[J]. Pipeline & Gas Journal 2004 231(12): 28~29