

基于指数型地下油气库系统可靠性置信区间研究

骆正山¹, 王耀峰¹, 张大睿², 代 朵¹

(1. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安铁一中, 陕西 西安 710054)

摘 要:在国内外学者研究的基础上,重点研究了几个影响地下储气库系统可靠性置信区间下限确定的特定部件(储气罐、集输管线和安全阀等),根据构成储气库系统的特定部件(储气罐、集输管线和安全阀等)寿命的分布不同,构建相应的模型.提出基于指数型地下油气储备库系统可靠性的置信区间求解精确下限的方法,并通过实证分析验证了该方法的有效性.打破了过去人们仅限于忽略时间因素而对地下油气储备库系统进行定性评估的局限,为石油天然气地下储备系统可靠性(风险)由定性评估向定量评估转化提供了一种有效的方法.同时也为地下油气储备库系统的正常维护提供必要的支持.

关键词:油气库系统;泄漏事故;可靠性;置信区间;精确下限

中图分类号:N949

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)03-0434-05

地下储气库的建设与发展始于上世纪初,从 1915 年加拿大安大略省的 Welland 气田的地下储气试验到 1959 年前苏联建成的第一个地下储气罐以及 1963 年美国在科罗拉多 Denver 附近首次建成废弃矿坑储气库,直到 2007 年底我国在西南地区建成的储气能力达到 8 亿 m^3 的地下储气库,到今天,地下储气库的研究已进行了 90 多年的历史.在此期间,地下储气库的安全问题(即可靠性问题)始终是一个研究的热点问题.多年来,地下储气设备的泄漏事故频发,给世界各国造成了巨大的经济损失,也直接危害到人们的生命和财产安全.据统计,仅俄罗斯新西伯利亚、北高加索等地区在 1998—1999 年间发生储油气设备断裂和爆炸事故达 55,931 次^[1],给人民生命财产造成巨大损失.我国石油天然气地下储气设备的断裂、爆炸事故近年也呈现上升趋势.仅 1997 年 10 月就发生了 11 起^[2].因此地下储气设备的可靠性问题日益突出,地下油气储备系统作为可靠性工程中的一个典型系统而备受关注.

国内外有不少学者曾对地下储气系统可靠性评估进行了大量研究^[3-4],提出了一些可靠性评估的方法.如 Agnihotri 利用马尔可夫更新点过程对储备系统进行分析研究提出了两单元储气设备系统首次失效平均时间的置信区间的确定问题^[5]. Winterbottem 提出的样本点排序法对地下储气设备系统可靠性的精确置信区间的确定^[6]等.目前地下储气库的可靠性评估,多见于上述方法.本文研究的是多成分气液组成的易燃易爆地下储备系统的可靠性问题.众所周知,石油、天然气是甲烷、乙炔等多种易燃易爆物的混合物,且产品的燃爆特性符合指数分布.本文重点放在对几个指数型产品和一个安全转换阀的地下储气库的可靠性置信区间下限确定问题的研究.假设构成地下油气库的多个部件中各部件有可替换的定时实验数据,其时间 T 是一个已知分布密度的随机变量.

1 与时间相关的系统可靠性问题

假设地下储气库系统由地面站场、集输管线和储气罐等多个部件和相应的安全转换阀组成.本文只研究系统中只有一个部件工作,当失效时,由安全转换阀切换至另一个安全设备工作,多次工作部件失效时,均如此转换.这里所研究的系统组成部件其寿命均服从参数为 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的指数分布,且各部件的寿命相互独立,又设安全转换阀多次使用成功的概率为 P ,且与系统安全部件的寿命无关.当

收稿日期:2012-10-29 修改稿日期:2013-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271278);陕西省重点学科建设专项资金资助项目(E08001)

作者简介:骆正山(1969-),男,陕西汉中,人,博士,教授,主要从事信息管理与信息系统、管道风险评估理论、建模与方法、企业信息化方面的教学和科研工作.

出现下列情况时,整个系统失效:1)小泄漏(失效半径 $D < 20 \text{ mm}$)和大泄漏(失效半径 $20 \text{ mm} \leq D \leq 80 \text{ mm}$),当出现小泄漏、大泄漏或断裂时,安全转换阀失效^[7];2)当出现小泄漏,大泄漏和断裂时,安全转换阀使用正常,但其他所有部件均失效,则地下油气储存系统与时间相关的可靠性 $R_{(t)}$ 有:

当 $\lambda_i = \lambda_j (i = 1, 2, \dots, n)$ 时,

$$R_{(t)} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda P t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

当 $\lambda_i \neq \lambda_j (i \neq j), i, j = 1, 2, \dots, n$ 时,为导出地下油气储存系统的可靠性,我们在此引入变量 v . 当安全转换阀首次出现失效发生在第 j 次使用时,令 $v = j (j < n)$;若不是首次出现失效时,令 $v = n$. v 是一个随机变量,则依据概率有:

$$P\{v = j\} = P_{j-1}(1 - P), j = 1, 2, \dots, n-1; \quad P\{v = n\} = P_{n-1}$$

在此用 A 表示地下油气储存设备系统的寿命. 则 $A = x_1 + x_2 + \dots + x_v$. 又因为组成油气储存设备系统的各部分的寿命分布参数两两不同,即 $i \neq j$, 则有 $\lambda_i \neq \lambda_j, (i, j = 1, 2, \dots, n)$. 则与时间相关的油气储存系统的可靠性 $R_{(t)}$ 为:

$$\begin{aligned} R_{(t)} &= P\{A > t\} = P\{x_1 + x_2 + \dots + x_v > t\} \\ &= \sum_{j=1}^{n-1} P\{x_1 + x_2 + \dots + x_v > t \mid v = j\} \cdot P\{v = j\} + P\{x_1 + x_2 + \dots + x_v > t \mid v = n\} \cdot P\{v = n\} \\ &= \sum_{j=1}^{n-1} P\{x_1 + x_2 + \dots + x_v > t\} \cdot P\{v = j\} + P\{x_1 + x_2 + \dots + x_v > t\} \cdot P\{v = n\} \\ &= \sum_{j=1}^{n-1} \left(\sum_{i=1}^j \left(\prod_{k=1, k \neq i}^j \frac{\lambda_k}{\lambda_k - \lambda_i} \right) e^{-\lambda_i t} \right) P^{i-1} \cdot (1 - p) + \sum_{j=1}^n \left(\left(\prod_{i=1, i \neq j}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_j} \right) e^{-\lambda_j t} \right) \cdot P^{n-1} \end{aligned}$$

整理计算后可得:

$$R_{(t)} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=i}^n \left(\prod_{k=1}^{j-1} (\lambda_k P) / \prod_{k=1, k \neq i}^j (\lambda_k - \lambda_i) \right) \right) \cdot e^{-\lambda_i t} \quad (2)$$

由此可以确定由相同寿命分布参数的部件组成的地下油气储存设备系统和寿命参数分布两两不同的部件构成的油气储存系统的可靠性.

2 系统部件的试验数据分析

通过高钢级容器、管线断裂全尺寸试验系统、腐蚀试验设备,对组成系统的第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个部件进行有替换的定时截尾模拟试验(令在时刻 $t = 0$),模拟试验时间 T_i 服从参数为 μ_i (已知)的指数分布,且 $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 相互独立. 此时,构成地下油气储存设备系统的各部件的实际失效时间难以得到,但可以获取在区间 $(0, T_i)$ 内失效的部件数量,该数量可用 $N_{(T_i)}$ 表示,且 $N_{(T_i)}$ 也是一个随机变量^[8]. 当 $T_i = t$ 时,可以得到 $N_{(T_i)}$ 的条件概率分布为:

$$P\{N_{(T_i)} = k \mid T_i = t\} = \frac{(n_i \lambda_i t)^k \cdot e^{-n_i \lambda_i t}}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots, n$$

因而得变量 $N_{(T_i)}$ 和 T_i 的联合概率分布为:

$$P(N_{(T_i)}, T_i)(k, t) = \frac{(n_i \lambda_i t)^k e^{-n_i \lambda_i t} \mu_i e^{-\mu_i t}}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots, t > 0$$

进而得到 $N_{(T_i)}$ 的边缘概率分布为:

$$\begin{aligned} P\{N_{(T_i)} = k\} &= \int_0^{+\infty} \frac{(n_i \lambda_i t)^k e^{-n_i \lambda_i t} \mu_i e^{-\mu_i t}}{k!} dt \\ &= \frac{\mu_i}{n_i \lambda_i + \mu_i} \left(\frac{n_i \cdot \lambda_i}{n_i \lambda_i + \mu_i} \right)^k, k = 0, 1, 2, \dots; i = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

由此可进一步分析研究基于指数分布的地下油气储存设备系统的精确置信区间.

3 地下储油气库系统可靠性精确置信区间确定

为便于分析,对于样本空间令 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为区间 $(0, T_i)$ 内 n_i 个定时截原实验的部件中失效

部件的个数. 向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为失效部件数, $\Omega = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) : x_i \text{ 为非负整数}, i = 1, 2, \dots, n\}$ 为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的样本空间. 显然, Ω 今有可列无限个元素.

为此, 先给出下列命题, 设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 是 Ω 中的两个样本点.

命题 1: 假设 $x_i \leq y_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 至少有一个 i , 使得 $x_{i0} < y_{i0}$. 则称样本点 x 优于 y , 称样本点 x 与 y 可比.

此时, 样本 x 的失效部件数比样本 y 少, 其失效置信区间下限较高, 所以样本 x 比 y 更具有合理性^[9].

命题 2: 假设存在一个 i_0 使得 $X_{i_0} = Y_{i_0} + 1$, 且有 $x_i = y_i (i \neq i_0, i, j = 1, 2, \dots, n)$. 则称样本点 y 是比 x 更优的相邻点.

该命题表示在取样空间两个样本点中, 有且仅有一个元素比另一个样本点中的对应元素大, 其余元素具有相同的样本点, 我们称其为与一个样本点相邻的且为劣的样本点.

由公式(3)及 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 间相互独立, 对于 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则有

$$P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n} \{X = x\} = P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n} \{X_i = x_i, 1 \leq i \leq n\} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{n_i \lambda_i}{n_i \lambda_i + \mu_i} \right)^{x_i} \cdot \left(\frac{\mu_i}{n_i \lambda_i + \mu_i} \right) \quad (4)$$

则对于给定置信度 $1 - \alpha$, 可以得出样本点的排列规则:

(1) $\omega^{(1)} = (0, 0, \dots, 0)$, 此时试验部件均未失效;

(2) $\omega^{(2)}$ 可从点 $(1, 0, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, 1)$ 中选择, 选择的原则为: 将这些点分别代入下式中的 $\omega^{(c)}$

$$\inf_{\substack{\lambda_i > 0 \\ i=1, 2, \dots, n}} \{R(t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \mid P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(\omega = \omega^{(1)}) + P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(\omega = \omega^{(c)}) \geq \alpha\}$$

取 infmax 的点为 $\omega^{(2)}$, 依此类推, 可得到 $\omega^{(1)}, \omega^{(2)}, \dots, \omega^{(i)}$, 对于 $\omega^{(i+1)}$ 的选取, 一般在较 $\omega^{(i)}$ 为劣的相邻点的集合与在选取 $\omega^{(i)}$ 时未被选取的点的集合的并集中选取. 先剔除明显较劣的点, 再将剩余点代入 $\omega^{(c)}$

$$\inf_{\substack{\lambda_i > 0 \\ i=1, 2, \dots, n}} \left\{ R(t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \mid \sum_{j=1}^i P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(\omega = \omega^{(j)}) + P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(\omega = \omega^{(c)}) \geq \alpha \right\}$$

使得 infmax 点为 $\omega^{(i+1)}$, 这样可穷尽所得样本点, 排位越靠前, 则样本点越优, 失效数就越少.

若实测样本点为 $\omega^{(r)}$, 则对于给定的置信度 $1 - \alpha$, $R(t)$ 的精确置信区间的下限 $d(\omega)$ 为:

$$d(\omega) = \inf_{\substack{\lambda_i > 0, i=1, 2, \dots, n}} \left\{ R(t) \mid \sum_{i=1}^r P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha \right\} \quad (5)$$

显然 $d(\omega)$ 具有以下特性:

由下而上排序过程得到:

(1) 当 $i \leq j$ 时, 有 $d(\omega^{(i)}) \geq d(\omega^{(j)})$; $i \geq j$ 时, 有 $d(\omega^{(i)}) \leq d(\omega^{(j)})$.

(2) 对于 $\forall \lambda_i > 0, (i = 1, 2, \dots, n)$ 可用 $\beta = \beta(\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_n)$ 表示满足下列条件的最小正整数, 即

$$\sum_{i=1}^{\beta} P(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha \quad (6)$$

$$\text{且} \quad \sum_{i=1}^{\beta-1} P(\omega = \omega^{(i)}) < \alpha \quad (7)$$

用 $S = S(s_1, s_1, \dots, s_n)$ 表示样本点的排序号, 则有:

$$d(s_1, s_2, \dots, s_n) = \inf_{\substack{\lambda_i > 0, i=1, 2, \dots, n}} \left\{ \exp\left(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \mid \sum_{i=1}^s P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha \right\}$$

设点 (s_1, s_1, \dots, s_n) 满足 $\sum_{i=1}^s P(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha$, 则 $\exp\left(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \geq d(s_1, s_1, \dots, s_n)$, 因而得

$$\left\{ (s_1, s_2, \dots, s_n) \mid \sum_{i=1}^s P(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha \right\} \subset \left\{ \exp\left(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \geq d(s_1, s_2, \dots, s_n) \right\}$$

如果 $S \geq \beta$, 那么, $\sum_{i=1}^s P(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha$, 故

$$\{s \geq \beta\} \subset \left\{ (s_1, s_2, \dots, s_n) \mid \sum_{i=1}^s P(\omega = \omega^{(i)}) \geq \alpha \right\}.$$

因为 $(S \geq \beta) \cong \{(s_1, s_1, \dots, s_n) \in \bigcup_{i=\beta}^{+\infty} \{\omega^{(i)}\}\},$

所以 $\{(s_1, s_1, \dots, s_n) \in \bigcup_{i=\beta}^{+\infty} \{\omega^{(i)}\}\} \subset \{\exp(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i) \geq d(s_1, s_1, \dots, s_n)\}.$

又因为 (s_1, s_1, \dots, s_n) 是样本空间中的点, 所以 $\{\exp(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i) \geq d(\omega)\} \supset \{\omega \in \bigcup_{i=\beta}^{+\infty} \{\omega^{(i)}\}\}.$

由此可得: $P(e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i} \geq d(\omega)) \geq \bigcup_{i=\beta}^{+\infty} P(\omega = \omega^{(i)})$

所以, 由(7)式可得: $\sum_{i=\beta}^{+\infty} P(\omega = \omega^{(i)}) \geq 1 - \alpha$

即: $P(e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i} \geq d(\omega)) \geq 1 - \alpha.$

也就是说, 当 $\lambda_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 时, $P_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n}(d(\omega) \leq R(t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)) \geq 1 - \alpha.$

4 实证分析

上面我们得出了给定置信区间时, $R_{(t)}$ 的精确置信区间的下限值及其具有的特性. 下面通过两个实例进行实证分析, 说明置信区间下限的精确解. 依据实验实测样本点 $\omega^{(r)}$, 利用公式(5) 经过数值计算可得该样本点在给定置信度 $1 - \alpha$ 的系统可靠性的精确置信区间下限.

假设地下油气储存系统由储气罐和集输管线两大部件和安全转换阀组成. $n = 2$, 对每个组成部件试验 5 次, $n_1 = n_2 = 5, \mu_1 = 0.1, \mu_2 = 0.2, P = 0.85, \alpha = 0.05$. 当 $t = 1$ 时, 油气储存库系统可靠性置信度 $1 - \alpha = 0.95$, 使用上述方法计算可得该地下油气储存系统可靠性的精确置信区间下限值为表 1 所示: 表中仅列出 $\omega^{(1)}, \omega^{(2)}, \dots, \omega^{(10)}$ 的精确置信区间下限值.

若对上述储备系统中的储气罐进行 15 次实验, 集输管线(均含安全转换阀) 试验 20 次, 即 $n_1 = 15, n_2 = 20$. 设 $\mu_1 = 0.1, \mu_2 = 0.09, P = 0.90, \alpha = 0.05$. 可求得在 $t = 1$ 时, 地下油气储备系统的可靠性在置信度 $1 - \alpha = 0.95$ 的精确置信区间下限值见表 2, 表中仅给出排在前 10 位的样本点对应的下限值.

表 1 地下油气库 $R_{(t)}$ 的精确置信区间下限值

Tab. 1 The exact lower confidence limits of $R_{(t)}$ under ground

$\omega^{(r)}$	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(1,1)	(2,0)
$cl(\omega)$	1.000 0	0.995 4	0.995 3	0.998 6	0.987 8
$\omega^{(r)}$	(0,2)	(1,2)	(2,1)	(2,2)	(0,3)
$cl(\omega)$	0.987 6	0.983 5	0.983 0	0.977 5	0.976 0

表 2 地下油气库 $R_{(t)}$ 的精确置信区间下限值

Tab. 2 The exact lower confidence limits of $R_{(t)}$ under ground

$\omega^{(r)}$	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(1,1)	(2,0)
$cl(\omega)$	1.000 0	0.999 6	0.999 2	0.999 1	0.999 0
$\omega^{(r)}$	(2,1)	(3,0)	(3,1)	(4,0)	(4,1)
$cl(\omega)$	0.998 9	0.998 8	0.998 7	0.998 4	0.998 0

5 结 语

长输油气管线和地下储油气库的可靠性评估在国内外已有不少文献予以讨论, 但大都集中在与时间无关的或定性的研究. 根据具体的构成储气系统的部件(储气罐、集输管线和安全阀等)寿命的分布不同, 评估方法也有所差异. 本文提出的基于指数型地下油气储备库系统可靠性置信区间求解精确下限的方法为定量评估地下油气储备库的可靠性及其风险提供了一种有效的方法. 通过实测和试验, 凭借计算机技术验证该算法合理可行. 但由于储备的油气介质和土壤本身的特点, 如腐蚀性、酸性、碱性、温度、湿度等条件的影响, 导致地下油气库失效的具体情况异常复杂, 如何将这些因素纳入到系统可靠性置信区间下限精确确定的研究之中, 仍需要进行大量的分析研究, 当然这也是我们下一步的研究方向.

参考文献 References

- [1] WU He-cheng. Studies on the Assessment Methods of System Reliability [M]. Beijing: Science Press, 2006.

- [2] AZARON A, KATAGIRI H, KATIO K, et al. Reliability evaluation of multicomponent cold-standby redundant system[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 173(1): 137-149.
- [3] AZARON A, KATAGIRI H, SAKAWA M, et al. Reliability function of time dependent systems with cold-standby redundant system[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(2): 378-386.
- [4] WU He-cheng. Exact lower confidence limit of reliability for the exponential lifetime type standby redundant system[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(3): 421-425.
- [5] 罗志军, 王历容. 随机插补下两线性模型中响应变量分位数差异的经济似然置信区间[J]. 数理统计与管理, 2010, 29(1): 88-101.
LUO Zhi-jun, WANG Li-ron. Empirical likelihood confidence intervals for quintile differences of response variables in two linear regression models under random imputation [J]. Journal of applied statistics and management. 2010, 29(1): 88-101.
- [6] WANG Xiao-wan, LUO Zheng-shan. Study on the adjacent pipeline failure consequence model of oil-gas transportation pipeline[C]// Bangkok, Thailand: World Academic Union (World Academic Press), Proceedings of the 3rd International Conference on Management Science and Engineering Management, 2009: 494-498.
- [7] LUO Zheng-shan, WANG Xiao-wan. On the models of calculating severe hazard caused by gas-leaking[C]// Shanghai, P. R. China: Proc. International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2009, ICPTT 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications, 2009, 361: 865-873.
- [8] LUO Zheng-shan, WANG Xiao-wan. Analytic study based on failure effects model of adjacent oil pipeline[C]// Moscow in Russia: 2009 International Conference on Management Science and Engineering - 16th Annual Conference Proceedings, ICMSE 2009: 271-276.
- [9] WU De-hui, HUANG Song-ling, ZHAO Wei, et al. Transient simulation analysis on magnetic flux leakage detection of cracks in long-distance oil and gas pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 136-140.

Study based on reliability confidence interval of exponential-typed underground oil-gas storage system

LUO Zheng-shan¹, WANG Yao-feng¹, ZHANG Da-rui², DAI Duo¹

(1. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Xi'an Tie Yi High School, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the study of the scholars both at home and abroad, the specific components to determine reliability lower confidence interval in a few underground gas storage system (tank, gathering pipelines and valves, etc.) is focused. According to the different distribution of specific components (tank, gathering pipelines and valves, etc.) where gas storage system is constructed, appropriate model is built up. Methods are proposed to solve the accurate lower limit on oil and gas database system for confidence interval of reliability based on exponential-type, which is verified as an effective method by empirical analysis, changing the people's idea of neglecting qualitative evaluation on the underground oil and gas database storage system. A new and effective means is proposed, which helps solve the problem of transforming qualitative evaluation to quantitative evaluation in the system. In addition, it provides the necessary support for the normal maintenance of the system.

Key words: oil and gas database system; reliability; confidence interval; accurate lower limit