

输油气管道泵站系统风险分析^{*}

张鹏 夏传宝 侯向秦 曹建

(西南石油大学)

张鹏等.输油气管道泵站系统风险分析.天然气工业,2006,26(3):121-124.

摘要 输油气泵站系统是管道系统的重要组成部分,为此进行输油气管道系统泵站风险评估十分必要。实际工程系统的可靠性指标既非常重要又相当复杂。绝大多数工程系统目前只有数值解,而找不出解析解。为此,介绍了计算输油气泵站系统可靠性的简单实用方法,并实例运用于秦皇岛—北京输油管道泵站系统。该泵站系统由6个泵站组成,为一个复杂可修系统;以宝坻站为例,并用系统稳态不可用度、平均无故障工作时间和平均修复时间作为可靠性指标,应用网络树分析和可靠性单元法对其进行简化计算,并在此基础上进行了泵站系统的风险分析。

关键词 油气输送 泵站系统 风险分析 可靠性 单元 应用

泵站是输油气管道系统的重要组成部分,由如下子系统组成:加压系统、加热系统(主要对于输油而言)、供电系统、通讯系统。

目前,输油气泵站系统及其相关设备往往以网络形式实现,其优点是可靠性高,投资省,维修费用低,并具有如下特点:①系统以网状形式运行;②元件的失效事件为一棵故障树;③可靠性分析为故障树分析上的网络分析;④网络树中的故障树均为单一因素时就退化为普通的网络;⑤故障树和网络树往往存在共因失效。

由于泵站系统的复杂性和可修性,使得应用现有的可靠性理论对其进行可靠性分析十分困难。为此,笔者综合运用网络树分析、可修系统可靠性单元法以及系统稳态不可用度等指标,来分析泵站系统的可靠性。

一、泵站系统风险分析的基本步骤

笔者以秦皇岛—北京输油管道泵站系统为例进行分析:①根据工艺流程,构建泵站网络树,抓住主要矛盾,进行适当简化;②以网络树为基础,对系统进行网络分析,对系统的每个元件进行故障树分析;③共因失效分析,实际工程中,因失效原因的共同作用,单元的失效往往存在着共因失效问题,共因失效

使得由传统计算方法得到的串联系统可靠度大大低于系统实际可靠度,而并联系统的计算可靠度又大大高于实际可靠度;④应用可靠性单元法,对网络进行简化计算,将网络中满足可靠性单元条件的部分视为一个单元,解算故障树;⑤风险分析,对于可修系统,采用可用度来度量其可靠性,以不可用度代替风险分析中的失效概率。

失效概率的计算是以元件或系统投入运行时是新的并且直到发生失效为前提条件的,它对于不可修系统非常合适。对于可修系统,随着运行时间的延长,必有元件维修更换,这时失效概率并不能反映其可靠性,用它作为可靠性指标将失去工程意义,而应采用不可用度作为其可靠性指标。

二、可靠性单元法

可修复系统的可靠度计算是非常重要的,但也是困难的。目前绝大多数工程系统只有数值解,而难以得到解析解。原因之一是复杂工程系统的马尔可夫过程非常复杂,难以写出其状态空间方程;之二是即使列出了其状态空间微分方程组,但解析这些微分方程也很困难。以由 N 个不同元件组成的串联可修系统为例,设各元件故障率和修复率分别为 λ_i 和 μ_i ,其中 $i=1,2,\dots,N$ 。为计算可靠度 $R(t)$ 和

^{*} 本文为石油科技风险创新研究项目成果,并受到石油科技中青年创新基金、“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室开放基金(PLN0113)资助。

作者简介:张鹏,1964年生,教授、博士生导师,西南石油大学建筑工程学院副院长。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道8号。电话:(028)83032105。E-mail:zp_swpi@sina.com

瞬态可用度 $A_s(t)$, 必须求解系统在不同状态下的发生概率, 即求解如下常微分方程组:

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{A} \times \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}(t)$ 为各状态概率的列向量, $\dot{\mathbf{P}}(t)$ 为各状态概率导数的列向量, $\mathbf{A}$ 为状态方程系数矩阵, 即

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \begin{Bmatrix} \dot{p}^0(t) \\ \dot{p}^1(t) \\ \dots \\ \dot{p}^N(t) \end{Bmatrix} \quad \mathbf{P}(t) = \begin{Bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ \dots \\ P_N(t) \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^N \lambda_i & \mu^1 & \dots & \mu^N \\ \lambda_1 & -\mu^1 & \dots & 0 \\ \dots & 0 & \dots & \dots \\ \lambda_N & 0 & \dots & -\mu^N \end{bmatrix}$$

初始条件为:

$$\mathbf{P}(0) = \begin{Bmatrix} P_0(0) \\ P_1(0) \\ \dots \\ P_N(0) \end{Bmatrix} = \mathbf{C} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{Bmatrix}$$

方程组(1)在初始条件下的特解为:

$$\{\mathbf{P}(t)\} = e^{\mathbf{A}t} \times \{\mathbf{C}\} \quad (2)$$

虽然得到了方程组(1)的解析表达式, 但在一般情况下还不能求出可用度的表达式, 困难在于 $e^{\mathbf{A}t}$ 的计算, 目前比较有效的方法还是数值解。为此必须寻求计算可修复系统可靠性指标的简单实用方法。下面给出几种常用的可靠性单元。

1. 可靠性单元及其特性

参数说明: λ 表示系统故障率; μ 表示系统修复率; A_s 表示系统稳态可用度; MUT 表示系统平均无故障工作时间; MDT 表示系统平均修复时间; i 表示可靠性单元。

(1) 可修 N 个不同元件串联可靠性单元

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad \mu_s = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$$

(2) 可修 N 个相同元件并联可靠性单元(1个修理工)

$$\lambda_s = \mu / \sum_{k=1}^N \frac{1}{k!} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^k \quad \mu_s = \mu$$

(3) 可修两个不同元件并联可靠性单元(1个修理工)

$$\lambda_s = \frac{\mu p^3 + \mu^2 p^2}{p^0 + p^1 + p^2} \quad \mu_s = \frac{\mu p^3 + \mu^2 p^4}{p^3 + p^4}$$

$$\text{式中: } p^0 = \frac{\mu^2 \mu^2 (\lambda \mu^2 + \lambda \mu^2 + \mu^2 \mu^2)}{[\lambda \mu^2 (\mu^2 + \lambda)(\lambda + \lambda + \mu^2) + \lambda \mu^2 (\mu^2 + \lambda)(\lambda + \lambda + \mu^2) + \mu^2 \mu^2 (\lambda \mu^2 + \lambda \mu^2 + \mu^2 \mu^2)]}$$

$$p^1 = \frac{\lambda (\lambda + \lambda + \mu^2)}{\lambda \mu^2 + \lambda \mu^2 \mu^2} p^0$$

$$p^2 = \frac{\lambda (\lambda + \lambda + \mu^2)}{\lambda \mu^2 + \lambda \mu^2 \mu^2} p^0$$

$$p^3 = \frac{\lambda \lambda (\lambda + \lambda + \mu^2)}{\mu^2 (\lambda \mu^2 + \lambda \mu^2 \mu^2)} p^0$$

$$p^4 = \frac{\lambda \lambda (\lambda + \lambda + \mu^2)}{\mu^2 (\lambda \mu^2 + \lambda \mu^2 \mu^2)} p^0$$

(4) 可修两个不同元件并联可靠性单元(2个修理工)

$$\lambda_s = \frac{\lambda \lambda (\mu^2 + \mu^2)}{\mu^2 + \mu^2} \quad \mu_s = \mu^2 + \mu^2$$

(5) 可修相同元件 R/N 系统可靠性单元(1个修理工)

$$\lambda_s = \frac{\mu}{(r-1)! \sum_{i=r}^N \frac{1}{i!} \times \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{i-r+1}} \quad \mu_s = \mu$$

(6) 可修 N 个相同元件冷贮备系统可靠性单元

$$\lambda_s = \frac{\lambda^N \mu - \lambda^{N+1}}{\mu^N - \lambda^N} \quad \mu_s = \mu$$

以上各种可靠性单元都有统一的可靠性指标可表达式:

$$A_s = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_s}{\mu_s}}, MUT = \frac{1}{\lambda_s}, MDT = \frac{1}{\mu_s} \quad (3)$$

2. 利用可靠性单元法计算可修系统的可用性

从可靠性单元性质可以看出, 一个单元的可靠性指标公式(稳态可用度, 平均无故障工作时间, 平均修复时间)如同一个元件的可靠性指标公式, 都有如下形式。

对单元有:

$$A_s = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_s}{\mu_s}}, MUT = \frac{1}{\lambda_s}, MDT = \frac{1}{\mu_s}$$

对元件: 只要把 λ_s, μ_s 换成元件的 λ, μ 即可。

在系统可靠性分析中, 反复利用可靠性单元的性质并与复杂网络最小路集或最小割集法等相结合, 即可方便地得到系统可靠性指标。

三、泵站系统的可靠性分析

泵站为复杂可修系统, 采用网络树分析方法和可靠性单元法可对其进行简化计算。下面以秦皇岛—北京输油管道系统宝坻泵站(夏季)为例来说

明。该泵站系统由6个泵站组成:首站秦皇岛,末站房山,中间站昌黎、迁安、丰润、宝坻和大兴。该系统于秦皇岛泵站接受大庆油田来油,在该泵站完成一部分原油向秦皇岛港口的油码头输油装船,另一部分经秦皇岛—北京输油管线向北京东方红炼油厂输油,担负着首都北京乃至华北地区的能源供应。

1. 网络树分析

宝坻站输油泵和加热炉等元件的失效与供电系统元件失效构成“或门”关系,显然系统存在共因供电失效。经共因失效分析,得到泵站系统可靠性逻辑框图,进而形成了网络树。

由可靠性单元法知,单元1~7、单元13和14为可修串联可靠性单元;单元8为可修 R/N 可靠性单元,可在单元4~7分析的基础上进行单元4~8的分析;单元9~12和单元15为可修 N 个相同元件并联可靠性单元,单元15可在两个单元14分析的基础上进行分析;单元16(即泵站系统)为可修串联可靠性单元,可在单元8~12和15分析的基础上进行。系统中单元8为加压系统,单元15为加热系统,单元12为通讯系统,其余为供电系统。

2. 可靠性分析

采用可靠性单元法对各可靠性单元进行计算,可以避免求解复杂的微分方程组。在以下计算中,A表示输油泵,B表示电机,C表示开关,E表示加热炉,D表示手动阀门,F表示电动阀门。

可靠性单元1: $\lambda_1 = \lambda_0 = 15/10^6$ $\mu_1 = \mu_0 = 0.25$

可靠性单元2: $\lambda_2 = \lambda_F = 15/10^6$ $\mu_2 = \mu_F = 0.25$

可靠性单元3: $\lambda_3 = \lambda_A + \lambda_B + \lambda_C = 1206/10^6$

$$\mu_3 = \frac{\lambda_3}{\frac{\lambda_A}{\mu_A} + \frac{\lambda_B}{\mu_B} + \frac{\lambda_C}{\mu_C}} = \frac{1}{48}$$

$$\lambda_4 = 1100/10^6 \quad \lambda_5 = 100/10^6 \quad \lambda_6 = 6/10^6$$

$$\mu_4 = \frac{1}{48} \quad \mu_5 = \frac{1}{48} \quad \mu_6 = 0.25$$

可靠性单元4: $\lambda_4 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1236/10^6$

$$\mu_4 = \frac{\lambda_4}{\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3}} = \frac{1}{47}$$

可靠性单元5: $\lambda_5 = \lambda_4 + \lambda_5 + 2\lambda_6 = 1251/10^6$

$$\mu_5 = \frac{\lambda_5}{\frac{\lambda_4}{\mu_4} + \frac{3\lambda_6}{\mu_6} + \frac{\lambda_6}{\mu_6}} = \frac{1}{46}$$

可靠性单元6: $\lambda_6 = 2\lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 = 1251/10^6$

$$\mu_6 = \frac{\lambda_6}{\frac{\lambda_4}{\mu_4} + \frac{2\lambda_5}{\mu_5} + \frac{\lambda_6}{\mu_6}} = \frac{1}{46}$$

可靠性单元7: $\lambda_7 = 2\lambda_6 + \lambda_5 + \lambda_6 = 1251/10^6$

$$\mu_7 = \frac{\lambda_7}{\frac{\lambda_6}{\mu_6} + \frac{2\lambda_5}{\mu_5} + \frac{\lambda_6}{\mu_6}} = \frac{1}{46}$$

可靠性单元8: $\mu_8 = \frac{1}{46}$

$$\lambda_8 = \frac{\mu_8}{(r-1)! \sum_{i=r}^N \frac{1}{i!} \times \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{i-r+1}} = 708/10^6$$

取 $\lambda = \frac{1}{4}(\lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7)$

$$\mu = \frac{1}{4}(\mu_4 + \mu_5 + \mu_6 + \mu_7)$$

可靠性单元9: $\lambda_9 = \frac{2\lambda^2}{2\lambda + \mu} = 1.4/10^6$

$$\mu_9 = 0.125$$

取 λ 和 μ 分别为输电线的故障率 0.0003 和修复率 0.125,则可靠性单元10:

$$\lambda_{10} = \frac{2\lambda^2}{2\lambda + \mu} = 14/10^9 \quad \mu_{10} = 0.0125$$

取 λ 和 μ 分别为低压变压器的故障率 0.000003 和修复率 0.0125,则可靠性单元11:

$$\lambda_{11} = \frac{2\lambda^2}{2\lambda + \mu} = 14/10^9 \quad \mu_{11} = 0.0125$$

取 λ 和 μ 分别为高压变压器的故障率 0.000003 和修复率 0.0125,则可靠性单元12:

$$\lambda_{12} = \frac{2\lambda^2}{2\lambda + \mu} = 14/10^8 \quad \mu_{12} = 0.5$$

取 λ 和 μ 分别为通讯系统(公用电话,管道微波)的故障率 0.0001 和修复率 0.5,可靠性单元13:

$$\lambda_{13} = \lambda_E + \lambda_C = 236/10^6, \mu_{13} = \frac{\lambda_{13}}{\frac{\lambda_E}{\mu_E} + \frac{\lambda_C}{\mu_C}} = \frac{1}{3}$$

而 $\lambda_E = 230/10^6$, $\mu_E = 1/3$, $\lambda_C = 6/10^6$, $\mu_C = 0.25$ 。

可靠性单元14: $\lambda_{14} = \lambda_{13} + 2\lambda_6 = 266/10^6$,

$$\mu_{14} = \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{13}/\mu_{13} + 2\lambda_6/\mu_6} = \frac{1}{3}$$

可靠性单元15: $\lambda_{15} = \frac{2\lambda^2}{2\lambda + \mu} = 0.4/10^6$, $\mu_{15} = \frac{1}{3}$

取 λ 和 μ 分别为 λ_{14} , μ_{14} , 则可靠性单元16:

$\lambda_{16} = \lambda_6 = \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + 3\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{15} = 715/10^6$

$$\mu_{16} = \mu_8 = \frac{\lambda_{16}}{\frac{3\lambda_6}{\mu_6} + \frac{\lambda_{15}}{\mu_{15}} + \sum_{i=8}^{12} \frac{\lambda_i}{\mu_i}} = \frac{1}{46}$$

取 λ , μ 分别为配电柜的故障率 0.000002 和修复率 0.05,所以,系统可靠性指标如下:

$$A_s = \frac{1}{1 + \lambda / \mu_s} = 0.968, Q_s = 1 - A_s = 0.032$$

$$MUT = 1/\lambda = 1398 \text{ h}, MDT = 1/\mu_s = 46 \text{ h}$$

即宝坻泵站系统可用度为 0.968,不可用度为 0.032,平均无故障运行时间为 1398 h,平均修复时间为 46 h。

四、泵站系统的风险分析

由风险分析理论知,工程系统的风险是系统失效概率和失效造成的后果的乘积,即 $R = P_f \cdot C$ 。

在可修复杂系统中,可用度是系统某时刻可用的概率,不可用度 Q_s 是系统某时刻不可用的概率。此时,风险计算公式变为: $R = Q_s \cdot C$ 。

根据现场调查,系统失效后果 C 由 C_1 和 C_2 组成: $C = C_1 + C_2$ 。 C_1 表示事故后各种赔偿费用(环境污染、占地、因公伤亡)、用工费用和材料费用等; C_2 表示事故后造成的停产损失(包括管道及其设备损失), $C_2 = q \cdot r \cdot MDT$ 。其中: q 表示单位时间输油量, t/h; r 表示油价, 元/t。

经调查知,宝坻泵站系统 $C_1 = 10$ 万元,单位时间输油量为 856 t/h,油价为 1300 元/t,则该泵站系统稳态时造成的输油风险是:

$$R = Q_s \cdot (C_1 + q \cdot r \cdot MDT) = 164 \text{ (万元)}$$

五、结 论

应用网络树分析和可靠性单元法可大大简化

复杂工程系统的可靠性分析,并在此基础上进行泵站系统的风险分析。根据相关标准与法规,对风险结果进行判断。若该风险可接受,则不需采取措施;若该风险不可接受,则需采取一系列措施降低风险。

参 考 文 献

- [1] 张鹏.压力容器和管道风险技术的价值和相互关系的展望[J].油气储运,1996,15(5):54-59.
- [2] 郭波,武小悦,等编著.系统可靠性分析[M].湖南长沙:国防科技大学出版社,2002.
- [3] MUHLBAUER W K. Pipeline Risk Management Manual [M]. Second Edition, Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1996.
- [4] ZHANG PENG. Fuzzy Assessment of Pipeline Risk [C]//The Proceedings of 1st Inter Conf on Computer Simulation in Risk Analysis & Hazard Mitigation. Spain, 1998.
- [5] MAHER A N, MARK J S. Risk-based Optimization of Pipeline Integrity Maintenance [C]//1995 OMAE—Volume II, Safety and Reliability. ASME, 1995: 303-314.
- [6] 张连诚.决策分析[M].辽宁沈阳:辽宁教育出版社,1994.
- [7] 谭平.输气管道振动分析[J].天然气工业,2005,25(1):133-134,140.

(修改回稿日期 2006-02-19 编辑 居维清)