文章编号:1673-5005(2013)05-0140-05 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.05.020

深水防喷器组井口连接器可靠性研究

刘永红, 刘增凯, 蔡宝平, 田晓洁, 纪仁杰

(中国石油大学机电工程学院,山东青岛 266580)

摘要:通过分析深水防喷器组位于井口时井口连接器的工作状态和重要失效模式,建立水下井口连接器的 Markov 模型,得到计算系统瞬态和稳态可靠性指标的公式。以墨西哥湾的防喷器可靠性数据为例,定量求解水下井口连接器的瞬态、稳态可用度和平均无故障时间 *MTTF*,研究模型中状态转移概率对系统的稳态可用度和 *MTTF* 的影响。结果表明:水下井口连接器具有很高的稳态可用度和 *MTTF*;降低水下井口连接器在正常运行期间发生"外部泄露"和"解锁失败"故障的概率可以有效地提高系统稳态可用度和 *MTTF*,而在测试期间发生故障的概率对系统性能的影响较小。

关键词:水下井口连接器; 深水防喷器组; 可靠性; 平均无故障时间

中图分类号:TE 921.4 **文献标志码**:A

Reliability research on subsea wellhead connector of blowout preventer stack

LIU Yong-hong, LIU Zeng-kai, CAI Bao-ping, TIAN Xiao-jie, JI Ren-jie

(*College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: Markov model of subsea wellhead connector was presented by analyzing its work status and main failure modes when the blowout preventer (BOP) stack was on wellhead, and the equations to calculate the reliability index were derived. Transient-state and steady-state availability, and mean time to failure (*MTTF*) were obtained based on the reliability data of the BOP in the Gulf of Mexico. The effects of state transition probability in the model on the steady-state availability and *MTTF* of the system were studied. The research results show that subsea wellhead connector has very high steady-state availability and *MTTF*. In addition, decreasing the probability of external leakage and unlocking failure can effectively improve the steady-state availability and *MTTF* of system, and the failure probability during the test period has little effects on system performance.

Key words: subsea wellhead connector; subsea blowout preventer; reliability; mean time to failure

深水防喷器组安装在水下井口上使用,是保证深水钻井作业安全的关键设备,典型的配置包括水下井口连接器、四套闸板防喷器、隔水管连接器、两套环形防喷器、挠性接头、节流压井管线和阀等[1-2]。所有的水下防喷器组都配备井口连接器和水下隔水管总成连接器[3]。井口连接器用于将防喷器组连接到水下井口上。隔水管连接器用于将水下隔水管总成连接到下部防喷器组的上方[4-5]。蔡宝平等[6]采用 Markov 方法考虑共因失效建立了水下防喷器组的可靠性模型,对深水防喷器组的配置进行了研究。薛鲁宁等[7]采用 Markov 方法建立了水下防喷器的模型,对深水钻井水下防喷器防喷功能的可靠性进行了定量计算。考虑共因失效、不完全覆盖、不完全维修和预防性维护等因素对深水防喷器电控系

收稿日期:2013-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51309240);国家"863"高技术研究发展计划项目(2013AA09A220);教育部"长江学者和创新团队发展计划"项目(IRT1086);中央高校基本科研业务费专项 (14CX06052A)

作者简介:刘永红(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事特种加工技术及装备、海洋石油装备等方面的研究工作。E-mail:liuyh@upc.edu.cn。

统可靠性影响的研究工作也已经完成[8-9]。Holand 等[10]搜集了深水防喷器故障数据,建立了水下防喷器发生井喷或泄露的故障树,对深水防喷器的可靠性进行了定性分析,但没有建立井口连接器的故障树。关于水下井口连接器的可靠性模型一直未见文献报道。因此,笔者建立水下井口连接器的 Markov 模型,得到系统的可靠性指标,对影响系统性能的因素进行分析。

1　系统模型的建立

水下防喷器系统按照失效的部位可分为 7 个子系统,分别是:环形防喷器、液压连接器、挠性接头、闸板防喷器、节流和压井阀、节流和压井管线及主控系统[10]。液压连接器包括井口头连接器和隔水管连接器。深水防喷器系统发生故障时,它可能处于以下情况:(1)在水下井口头上工作;(2)位于平台上;(3)下放到井口头的过程中或者将其拉出水面的过程中。其中,绝大部分的失效发生在深水防喷器组位于井口头上时,此时发生的失效被定义为重要失效。因为一旦防喷器发生故障,就不能阻止井喷的发生。有鉴于此,本文只考虑深水防喷器组位于水下井口上的工作情况。

水下井口连接器有两种重要失效模式:“外部泄露”和“解锁失败”。“外部泄露”故障是指井口连接器发生密封失效,井口内的液体泄露到海水中。“解锁失败”故障是指不能够解除防喷器组和井口头的连接。在进行深水钻井作业时,水下井口连接器位于井口上正常运行。当水下井口连接器发生故障时,需要将整个防喷器组拉出水面进行维修。维修完成后防喷器组不能立即投入使用,根据 API 规范需要进行安装测试,测试成功后,防喷器组才能正常使用。如果在安装测试过程中水下井口连接器又发生故障,则须再次进行维修和测试,直至安装测试成功。此外,在防喷器正常工作时,每周须进行定期测试,以确保防喷器的所有功能正常运行。根据水下井口连接器可能出现的失效模式及其工作状态,建立如图 1 所示的 Markov 模型。

图 1 中模型的各个状态的描述为:状态 S_0 表示水下井口连接器正常运行;状态 S_1 表示水下井口连接器失效,出现“外部泄露”的故障;状态 S_2 表示水下井口连接器失效,出现“解锁失败”的故障;状态 S_3 表示水下井口连接器经过维修后进行安装测试;状态 S_4 表示水下井口连接器在安装测试或者定期测试期间失效;状态 S_5 表示对水下井口连接器进行定期测试。

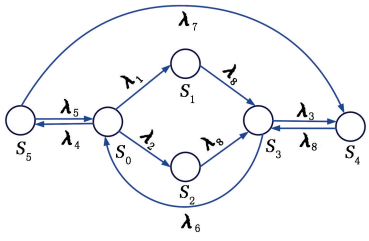


图 1　水下井口连接器 Markov 模型

Fig. 1　Markov model of subsea wellhead connector

Markov 模型中状态转移时间函数都服从指数分布,因此状态转移率都为常数,系统处于各个状态的平均逗留时间为状态转出率和的倒数[11-12]。假设系统 0 时刻处于状态 i,进入下一个状态 j 的转移率为 λ,则在 t 时刻系统进入状态 j 的概率为 $1-e^{-\lambda t}$。模型中各个状态间的转移率的含义如下所示。

(1) λ_1 表示单位时间内发生“外部泄露”的故障数;

(2) λ_2 表示单位时间内发生“解锁失败”的故障数;

(3) λ_3 表示在安装测试期间,单位时间内发生的故障数;

(4) λ_4 为进行定期测试率,表示单位时间内进行定期测试的数量,为测试周期的倒数;

(5) λ_5 为定期测试完成率,表示单位时间内完成的定期测试数,为定期测试平均持续时间的倒数;

(6) λ_6 为安装测试完成率,表示单位时间内完成的安装测试数,为安装测试平均持续时间的倒数;

(7) λ_7 表示在定期测试期间,单位时间内发生的故障数;

(8) λ_8 是维修率,表示单位时间内维修的故障数,为平均维修时间的倒数。

2　可靠性指标的求解

根据图 1 所示的状态转移图,得到水下井口连接器的状态转移矩阵:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} -\lambda_1-\lambda_2-\lambda_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & \lambda_4 \\ 0 & -\lambda_8 & 0 & \lambda_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_8 & \lambda_8 & 0 & 0 \\ \lambda_6 & 0 & 0 & -\lambda_6-\lambda_3 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & -\lambda_8 & 0 \\ \lambda_5 & 0 & 0 & 0 & \lambda_7 & -\lambda_5-\lambda_7 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

令 $P_i(t)(i=0,1,\cdots,5)$ 为系统在时刻 t 处于状态 S_i 的概率。由水下井口连接器的模型和概率公式可以得到其 Markov 模型方程组:

$$\begin{cases} P_3(t)\lambda_6 + P_5(t)\lambda_5 - P_0(t)(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_4) = \dfrac{\mathrm{d}P_0(t)}{\mathrm{d}t}, \\ P_0(t)\lambda_1 - P_1(t)\lambda_8 = \dfrac{\mathrm{d}P_1(t)}{\mathrm{d}t}, \\ [P_1(t)+P_2(t)+P_4(t)]\lambda_8 - P_3(t)(\lambda_3+\lambda_6) = \dfrac{\mathrm{d}P_3(t)}{\mathrm{d}t}, \\ P_3(t)\lambda_3 + P_5(t)\lambda_7 - P_4(t)\lambda_8 = \dfrac{\mathrm{d}P_4(t)}{\mathrm{d}t}, \\ P_0(t)\lambda_4 - P_5(t)(\lambda_5+\lambda_7) = \dfrac{\mathrm{d}P_5(t)}{\mathrm{d}t}, \\ \sum_{i=0}^{5} P_i(t) = 1, \\ P_0(0) = 1. \end{cases} \tag{2}$$

求解方程组(2)可以得到系统处于各个状态的瞬态概率。当系统处于安装测试态 S_3 或者定期测试态 S_5 时,水下井口连接器仍可正常工作,所以系统的瞬态可用度为

$$A(t) = P_0(t) + P_3(t) + P_5(t). \tag{3}$$

令 $P_i(i=0,1,\cdots,5)$ 为系统处于各个状态的稳态概率,$P_i = \lim\limits_{t\to\infty} P_i(t)$,得到系统的稳态概率方程组为

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_4) = P_3\lambda_6 + P_5\lambda_5, \\ P_1\lambda_8 = P_0\lambda_1, \\ P_3(\lambda_3+\lambda_6) = (P_1+P_2+P_4)\lambda_8, \\ P_4\lambda_8 = P_3\lambda_3 + P_5\lambda_7, \\ P_5(\lambda_5+\lambda_7) = P_0\lambda_4, \\ \sum_{i=0}^{5} P_i = 1. \end{cases} \tag{4}$$

系统正常工作的稳态可用度为

$$A = P_0 + P_3 + P_5. \tag{5}$$

平均无故障时间(mean time to failure, *MTTF*)是系统的一个重要可靠性指标,它是指系统从正常运行到失效出现之前的平均时间,计算过程[14]如下所示:

(1) 令向量 $P(t) = [P_0(t), P_1(t), \cdots, P_5(t)]$ 表示 t 时刻系统的状态分布。定义系统的初始分布 $P(0) = [1,0,0,0,0,0]$,此时系统处于状态 S_0,为正常运行状态;

(2) 当系统进入状态 S_1, S_2, S_4 时发生失效,因此定义这 3 个状态为吸收态,舍弃矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中与吸收态有关的元素,得到矩阵:

$$\boldsymbol{A}_R = \begin{bmatrix} -\lambda_1-\lambda_2-\lambda_4 & \lambda_4 \\ \lambda_5 & -\lambda_5-\lambda_7 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

(3) 经过 Laplace 变换,建立方程:

$$[P_0^*(0), P_5^*(0)]A_R = [0, -1]. \tag{7}$$

(4) *MTTF* 可以表示为

$$MTTF = P_0^*(0) + P_5^*(0). \tag{8}$$

3 系统性能分析

将 Markov 模型中状态转移率代入推导的公式中,得到水下连接器的可靠性指标。Holand 系统地搜集了 2007—2009 年位于墨西哥湾的水下防喷器系统的可靠性和井涌数据,这些数据主要来源于美国安全和环境执法局的电子油井系统记录的油井活动报告[10]。Holand 的研究报告中一共搜集了 259 口油井的防喷器数据,所有油井的水深都超过 610 m;他还搜集了井口连接器的故障信息以及进行相关测试所需要的时间。本文依据这些可靠性数据,分析位于墨西哥湾的水下连接器的可靠性。因此,各个转移率的取值为:$\lambda_1 = 2.77\times10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_2 = 2.77\times10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_3 = 5.53\times10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_4 = 5.95\times10^{-3}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_5 = 7.66\times10^{-2}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_6 = 7.66\times10^{-2}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_7 = 2.77\times10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1}$;$\lambda_8 = 1.04\times10^{-2}\ \mathrm{h}^{-1}$。

根据式(3)可以求得系统的瞬态可用度,如图 2 所示。水下井口连接器的瞬态可用度在前 350 h 迅速减小,之后随着时间的增加缓慢降低达到稳态值0.99949。根据求解 *MTTF* 的过程,可以求得水下井口连接器的 $MTTF = 187\,431$ h(7 810 d)。可见,水下井口连接器具有极高的可靠性。

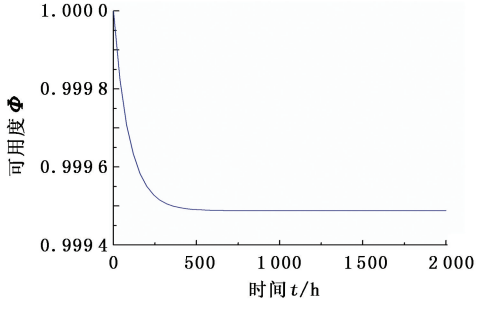


图 2 水下井口连接器可用度随时间的变化

Fig. 2 Transient availability of subsea wellhead connector

对于可修系统,稳态可用度是常用的可靠性评

价指标,它表征系统长期工作的能力。水下井口连接器的稳态可用度可以由式(5)求得。各个状态转移概率对水下井口连接器稳态可用度的影响,如图 3 所示。

失效率 λ_1 和 λ_2 对稳态可用度的影响相同且最大;而在安装测试期间发生的故障对系统的稳态可用度影响最小(图 3(a))。所以,为了提高系统的稳态可用度应该尽量降低其在正常运行期间发生故障的概率。水下井口连接器的稳态可用度随着 λ_4 的增大而缓慢增大。虽然缩短定期测试的周期可以在一定程度上提高系统的稳态可用度,但同时也会增大钻井的成本(图 3(b))。随着定期测试完成率 λ_5 的增大,系统的稳态可用度快速降低然后降低趋势变缓;而安装测试完成率 λ_6 对稳态可用度的影响较小(图 3(c))。随着维修率的增大,稳态可用度先快速升高然后增大趋势变小(图 3(d))。所以,在目前的维修水平下,增大平均维修时间会使系统的稳态可用度大幅度地降低。

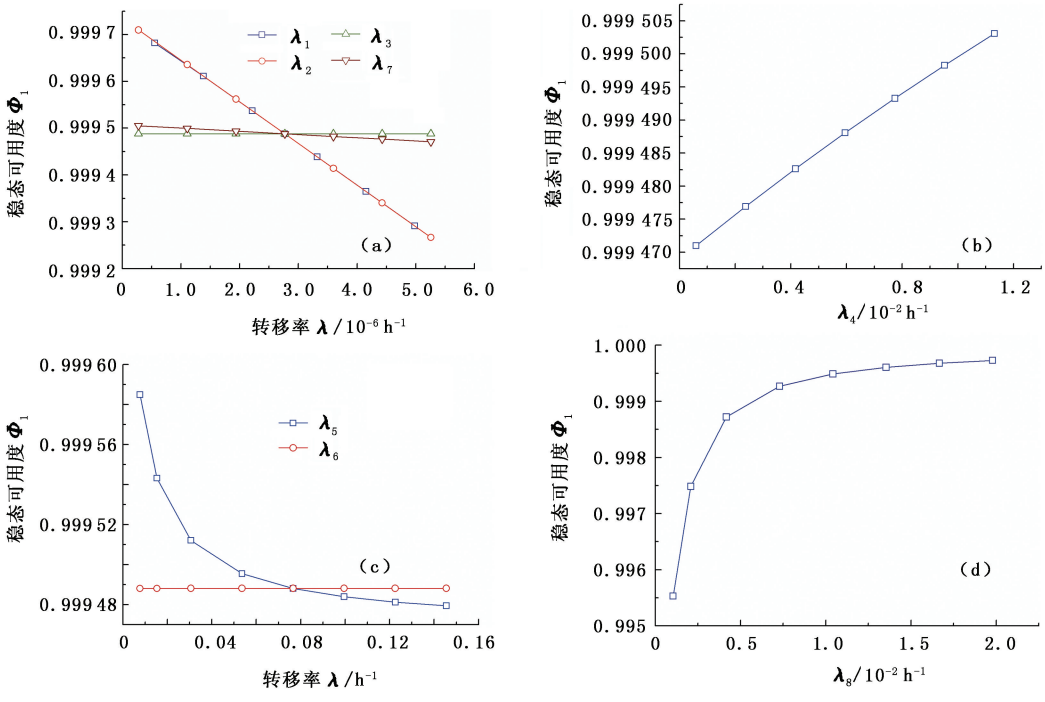


图 3　转移率对稳态可用度的影响

Fig. 3　Effects of transition rates on stable availability

根据式(6)~(8),系统的 *MTTF* 只与 λ_1,λ_2,λ_4,λ_5 和 λ_7 相关,它们对 *MTTF* 的影响如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,降低 λ_1 和 λ_2 可以大幅度地提高 *MTTF*,而 λ_7 对 *MTTF* 的影响相对较小。如图 4(b)和(c)所示,λ_4 和 λ_5 对系统 *MTTF* 的影响与其对稳态可用度的影响相似。因此,在目前各个状态转移率水平下,提高水下井口连接器 *MTTF* 的最有效的方法是降低其在正常运行期间发生“外部泄露”和“解锁失败”的故障率。

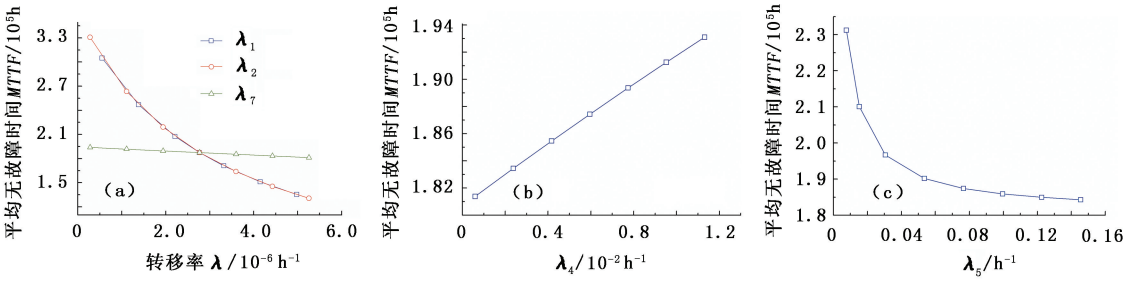


图 4　转移率对 *MTTF* 的影响

Fig. 4　Effects of transition rates on *MTTF*

4 结束语

以墨西哥湾的防喷器可靠性数据为例,得到了水下井口连接器的可靠性指标,其中,瞬态可用度随着时间的增加迅速达到稳态值 0.999 49,系统的平均无故障时间为 7 810 d。研究了模型中各个状态转移概率对系统的稳态可用度和 *MTTF* 的影响;平均维修时间和在正常运行期间发生的故障对系统的稳态可用度影响最大,安装测试平均持续时间和安装期间的故障对稳态可用度的影响最小;在正常运行期间发生的故障对系统的 *MTTF* 影响最大,其他转移概率对 *MTTF* 的影响较小。

参考文献:

[1] 孙宝江,曹式敬,李昊,等. 深水钻井技术装备现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术,2011,39(2):8-15.
SUN Bao-jiang, CAO Shi-jing, LI Hao, et al. Status and development trend of deepwater drilling technology and equipment [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(2):8-15.

[2] 许亮斌,张红生,周建良,等. 深水钻井防喷器选配关键因素分析[J]. 石油机械,2012,40(6):49-53.
XU Liang-bin, ZHANG Hong-sheng, ZHOU Jian-liang, et al. Analysis of the key factors for configuring deepwater drilling BOP [J]. China Petroleum Machinery, 2012,40(6):49-53.

[3] 畅元江,鞠少栋,陈国明,等. 深水钻井隔水管单根基本参数确定方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,3(1):117-121.
CHANG Yuan-jiang, JU Shao-dong, CHEN Guo-ming, et al. Determining methods for basic parameters of deepwater drilling riser single [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012,3(1):117-121.

[4] API 16D Specification for control systems for drilling well control equipment and control systems for diverter equipment [S]. Washington, DC, API, 2004.

[5] VIGEANT S P. Deepwater driven advancements in well control equipment and systems: IADC/SPE Drilling Conference, Society of Petroleum Engineers [C]. 1998:1-11.

[6] CAI B P, LIU Y H, LIU Z K, et al. Performance evaluation of subsea blowout preventer systems with common-cause failures [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012,90/91:18-25.

[7] 薛鲁宁,樊建春,张来斌. 基于马尔可夫方法的水下防喷器可靠性研究[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(10):72-75.
XUE Lu-ning, FAN Jian-chun, ZHANG Lai-bin. Research on reliability of subsea blowout preventer based on Markov method [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012,8(10):72-75.

[8] CAI B P, LIU Y H, LIU Z K, et al. Reliability analysis of subsea blowout preventer control systems subjected to multiple error shocks [J]. Journal of Loss Prevention in Process Industries, 2012,25(6):1044-1054.

[9] CAI B P, LIU Y H, LIU Z K, et al. Using Bayesian networks in reliability evaluation for subsea blowout preventer control system [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012,108:32-41.

[10] HOLAND P, AWAN H. Reliability of deepwater subsea BOP systems and well kicks [R]. Exprosoft, 2012.

[11] VEERAMANY A, PANDEY M D. Reliability analysis of nuclear piping system using semi-Markov process model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011,38:1133-1139.

[12] RAUSAND M. System reliability theory: models, statistical methods, and applications [M]. 2nd ed. Hoboken, New York: Whiley, 2004:101-130.

(编辑 沈玉英)