

文章编号: 1000-8241(2014)08-0807-06

干线天然气管道运行可靠性评价方法

张宗杰 谢青青 文江波 王喜

中国石油大学(北京), 北京 102249

摘要: 干线天然气管道是我国重要的战略能源通道,其运行可靠性研究显得十分必要。基于国内外相关文献调研,结合干线天然气管道的工艺特点,对干线天然气管道运行可靠性的重点评价指标进行筛选,并给出计算方法;运用可靠性基本理论和统计学基本方法,提出一种针对管道单元及压气站单元的运行可靠性评价方法;运用可靠性框图,建立单元与系统之间的联系,运用故障树分析法确定系统的薄弱环节,最终提出干线天然气管道系统运行可靠性的评价方法。(图5,表2,参31)

关键词: 干线天然气管道; 运行可靠性; 评价指标; 可靠性框图

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.08.002

Reliability evaluation method for gas trunk line

ZHANG Zongjie, XIE Qingqing, WEN Jiangbo, WANG Xi

China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249

Abstract: Gas trunk line is the important strategic energy channel in China. Therefore, the reliability research is essential. Through coalescing related Chinese and foreign literatures, key reliability evaluation indexes are screened, and the calculation method is provided combining with the technological characteristics of gas trunk line. A reliability evaluation method for pipe unit and compressor station unit is proposed by using basic theory of reliability and basic method of statistics. The connection between the units and system is established by using the reliability block diagram and the weak link in the system is determined through fault tree analysis. Ultimately, a reliability evaluation method for main gas pipeline is put forward. (5 Figures, 2 Tables, 31 References)

Key words: gas trunk line, operational reliability, evaluation index, reliability block diagram

随着国内燃气用户对天然气需求量的不断增加,干线天然气管道的输送任务日益艰巨,输气管道系统因运行安全问题造成的经济与社会损失影响重大。干线输气管道一旦发生大型事故,就会严重破坏管道沿线周围的环境,威胁附近人员的生命和财产安全。据统计,我国天然气管道事故率为 $4.3 \text{次}/(10^3 \text{km}\cdot\text{a})$ ^[1],较美国及欧洲天然气管道事故率高6~8倍,因此,提高国内管道的运行可靠性水平是现阶段管道运行管理和建设重要内容。干线天然气管道运行可靠性主要是指干线输气系统各组成单元处于可控、受控状态,并确保在事故状态下避免连锁反应而不会引起整个管道系统全线停输的能力。对于干线天然气管道运行可靠性的研究不仅要考虑管道系统中不同种类设备的运行可靠性,还要考虑设备在发生故障之后的修复能力^[2]。以下针对干线天然气管道运行可靠性所提出的综合指

标考虑了管道故障后的维修能力,这对以后研究管道的可靠性具有借鉴意义。

1 研究现状

国外关于输气管道可靠性的研究始于20世纪60年代,其中故障树结构的事故分析技术^[3]、事件树结构的可靠性分析技术^[4]和Bayesian法^[5]等均为输气管道可靠性研究提供了方法指导。前苏联20世纪60年代就进行了天然气管道系统的可靠性研究,并针对天然气管道的可靠性评价提出了评价指标。2010年,巴西石油公司与挪威船级社合作,采用工艺计算软件TGNET、天然气分配优化软件PLANAGE以及可靠性评价软件TARO,对巴西石油公司所辖天然气管网的可靠性进行了评价^[6],该研究提供了关于管道运行

可靠性水平评价的新思路。现阶段,虽然可靠性评价已广泛用于国内很多领域,但在我国油气管道领域的应用尚未起步,没有形成一套完整的输气管道运行可靠性评价方法。

评价输气管道运行可靠性的重要任务是:制定并完善可靠性指标体系,通过对输气管道历史数据的统计分析,利用所建立的可靠性评价模型计算得到可靠性指标数值,并建立相应的指标评价等级。运行可靠性评价指标是评价输气管道运行可靠性的定量标准,为此,需要提出统一的运行可靠性评价指标,这是输气管道系统运行可靠性分析理论的基础。国内外文献提到的输气管道系统可靠性指标很多,其中通用指标有:平均无故障运行时间、平均修复时间等,但针对输气管道的运行可靠性评价,尚需提出能够表示输气系统特征的可靠性指标体系。基于此,国内外相关文献提出了诸如故障状态下故障损失、系统致命度、管网生产效率、能量潜能、供应安全指标、可靠性系数等综合性运行评价指标^[7-9]。虽然有如此多的输气管道运行可靠性评价指标,但是现阶段还没有一套完整的输气管道系统运行可靠性评价理论,这是目前可靠性研究必须首先解决的问题。

目前,国内外有关输气管道运行可靠性的研究大致分为3种:①基于数据统计评价输气系统可靠性——运用历史运行数据评定输气系统的可靠性水平;②基于管材质量计算输气管道的结构可靠度^[10]——着重于计算输气管道因腐蚀等原因发生破裂的概率;③基于输气系统状态模拟计算供气效率^[6]——研究输气系统发生故障之后对用户的影响。以下通过研究电力系统^[11]与水力系统^[12]等相关领域的可靠性评价方法,结合天然气管道自身特点,充分利用管道历史运行数据,提出了一种对输气管道运行可靠性水平的整体评价方法。

2 干线天然气管道运行可靠性指标

2.1 评价指标

可靠性评价指标是用于定量衡量单元或系统可靠性水平的特征量,是整个可靠性评价过程的核心研究内容之一。干线天然气管道运行可靠性指标要求不仅能反映设备正常运行能力,而且能反映系统在故障之后的修复能力。提出的输气管道运行可靠性评价方

法,主要涉及以下评价指标。

(1)平均工作时间(Mean Time Between Failures, MTBF)、故障率和可靠度。平均工作时间 MTBF 是指可修复的输气元件一次故障发生后到下一次故障发生前无故障工作的时间均值;故障率 λ 是指单元或系统工作到某一时刻尚未失效,在该时刻后,单位时间内失效的概率;可靠度 $R(t)$ 是指单元或系统在规定条件下和规定时间 $(0, t)$ 内完成规定功能的概率^[4]。该评价指标被广泛运用于管道系统各类可靠性评价中。以上三者之间的关系为:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) = \exp\left(-\frac{t}{\text{MTBF}}\right) \quad (1)$$

(2)平均修复时间(Mean Time to Repair)、修复率和维修度。平均修复时间 MTTR 是指可维修的输气管道元件发生一次故障后需要的维修时间的均值;修复率 μ 是指维修时间已达到某个时刻但尚未修复的单元或系统,在该时刻后的单位时间内完成维修的概率;维修度 $M(\tau)$ 是指在规定条件下单元或系统发生故障后,在规定时间 $(0, \tau)$ 内按照规定程序和方法进行维修时,恢复到能完成规定功能状态的概率^[13]。以上三者之间的关系为:

$$M(\tau) = 1 - \exp(1 - \mu\tau) = 1 - \exp\left(1 - \frac{\tau}{\text{MTTR}}\right) \quad (2)$$

(3)可用度(Availability)。可用度 $A(t)$ 是时间的函数,是指可能维修的输气管道元件在规定条件下使用时,在某时刻具有其功能的概率^[13]。稳态可用度是指输气管道元件工作状态趋于稳定时的可用度,输气管道通常用稳态可用度表示其可用程度的高低,其表达式为:

$$A(\infty) = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (3)$$

以上7个指标是广义可靠性理论基础涉及的可靠性单一评价指标,可以用于输气管道系统中任何一个设备或者单元的运行可靠性的评估。

(4)输量损失 Δq ^[14]。该指标表征了输气管道系统因故障而导致的输量损失大小,只用于衡量输气管道系统达到稳定状态时可能的输量损失。

$$\Delta q = [1 - A(\infty)]q \quad (4)$$

式中: Δq 为某种故障状态下的输量损失, m^3/a ; q 为正常运行状态下输气管道的输量, m^3/a ; $A(\infty)$ 为单元或系统的稳态可用度。

(5)故障风险 $F^{[15]}$ 。

$$F = (q \cdot r \cdot \text{MTTR} + C^*) (1 - A) \quad (5)$$

式中: r 为天然气价格, m^3 ; C^* 为每次事故的设备破坏损失和人员伤亡损失, 10^4 元。

输量损失和故障风险为综合可靠性指标,用于衡量输气系统可能发生故障的损失以及事故后果的严重程度,一般只用于衡量系统整体的运行可靠性水平。

2.2 指标评价等级

运行可靠性指标评价等级是针对一个或多个运行可靠性指标,制定一个数值等级或规定一个数值目标,根据不允许超过或者必须达到一个或多个数值要求,综合给出输气管道系统运行可靠性水平的极限值,用于判断系统或单元的可靠性水平。该指标评价等级用于判断是否需要输气管道单元或系统进行维修,以及决定如何维修或改进。以下结合电力系统、水力系统、经济分析等相关领域的可靠性评价经验,给出针对输气管道系统运行可靠性评价的指标等级分级建议(表 1),据此可以定性判断研究对象的运行可靠性水平,适用于输气管道单元、压气站单元以及系统整体的运行可靠性评价。

表 1 管道运行可靠度等级^[16]

可靠度等级	可靠度描述	可靠度数值
0	完整	0.95~1
1	高	0.9~0.95
2	较高	0.7~0.9
3	适中	0.5~0.7
4	较低	0.2~0.5
5	低	0~0.2

参照挪威船级社在输气站场进行定量风险评价的后果等级划分经验,确定相应故障后果和对应的范围(表 2),该等级划分适用于系统整体的运行可靠性水平评价。

表 2 故障风险等级^[17]

后果等级	失效总成本 / (10^4 元)
A	≤ 70
B	70 ~ 700
C	700 ~ 7 000
D	7 000 ~ 70 000
E	$\geq 70 000$

按照表 1、表 2 的等级划分原则,确定可靠性矩阵(图 1)。该风险矩阵横坐标为故障风险等级,纵坐标为可靠度等级,其中低可靠性区域为不可接受可靠性区域。

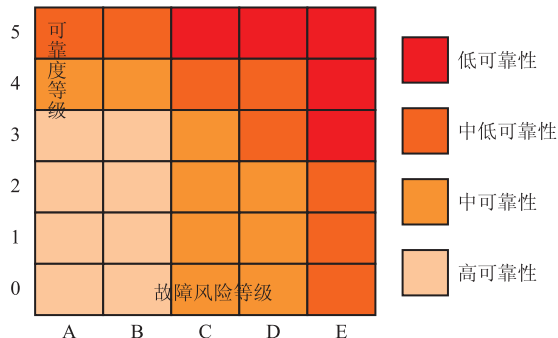


图 1 可靠性矩阵图

可靠度等级是技术性的等级划分,故障风险等级是经济性的等级划分。输气管道系统应用可靠性指标评价等级的目的:在合理的投资限度内,减少用户的断气事故次数和损失。对于不同气候、地理、经济条件和社会环境的国家或地区,以及不同的计算方式和步骤,可靠性指标评价等级的划分也会有所差别,应该根据自身管理水平、环境、计算理念等诸多因素,适当做出调整。

3 干线天然气管道运行可靠性评价

干线天然气管道由多个管段、压气站以及自控系统组成,任何一个组成部分发生故障都可能对用户的供气造成影响。在对输气管道系统运行可靠性进行研究时,需要全面考虑,包括系统结构、工艺以及所用材料、运行环境等。

输气管道系统运行可靠性研究的主要难点:①科学地量化各个单元可靠性,在确定各单元可靠性基础上,研究输气管道整体运行可靠性;②建立输气管道系统与各单元之间可靠性关联;③建立可靠性数据库,确定各种因素对管道可靠性的影响大小^[18]。为此,运用数据统计分析方法评价干线天然气管道的运行可靠性,同时基于研究难点提出具体的解决方法。

运用该方法评价干线天然气管道运行可靠性时,首先需要对管道系统的失效模式^[19]进行评定。失效模式是指失效的具体表现形式,例如,管道单元的失效模式主要是断裂、变形与泄漏。其次,建立相应的输气管道系统运行工况与事故数据库^[20],分别对不同故障

发生的具体时间、影响程度、管流参数等做详细记录。管道数据库要求能够全面有效地反映管道系统的运行状况,这就需要针对系统中的不同设备、不同管段建立各个子系统的模块数据库,数据库内不仅能够反映管道的正常运行状态,而且能够反映系统受到某种扰动后的运行状态。基于完整的管道数据库,才能对干线管道的运行可靠性进行全面评价。

3.1 运行可靠性指标计算

根据干线天然气管道的特点,将管道系统的可靠性评价分为3个部分,分别是管道单元、压气站单元与自控系统,其中自控系统可靠性水平影响的是数据采集以及故障后的控制过程,对于整个输气系统的运行可靠性影响相对较小,因此不单独叙述其可靠性评价方法。处于偶然失效期^[21]的管道单元、压气站单元的可靠性评价方法如下。

3.1.1 管道单元

管道单元是指不包括压气站、截断阀、清管站等在内的圆管部分。管道单元运行可靠度数值的求解步骤如下:

(1) 根据管道途经地区等级、水文地质状况、管龄、壁厚、管径将管道分成 n 段^[22],再根据历史数据统计得到管道各段的 $MTBF_i$ 和 $MTTR_i$ 数值,其中 i 表示第 i 段管道。统计处理步骤:搜集整理数据、确定样本标准差、制作数据分组表、绘制频率分布直方图以确定分布、分布检验、参数估计^[23]。

(2) 根据国内外相关管道可靠性研究成果^[24-25],管道系统的故障时间和维修时间服从指数分布,故障率和维修率指标为常数。由此可得管道故障率和修复率计算式:

$$\lambda_i = \frac{1}{MTBF_i}, \mu_i = \frac{1}{MTTR_i} \quad (6)$$

(3) 根据指数分布函数计算第 i 段管道第 t 年的可靠度与维修度:

$$R(t)_i = \exp(-\lambda_i t), M(t)_i = \exp(-\mu_i t) \quad (7)$$

式中: $R(t)_i$ 为第 i 段管道的可靠度; $M(t)_i$ 为第 i 段管道的维修度; t 为预测管道运行年限, a。

(4) 计算第 i 段管道的稳态可用度:

$$A(\infty) = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (8)$$

由以上步骤逐个求解每个管段的运行可靠度数值,并与表1中运行可靠度等级进行比较,就可以初步

判断每一段管道的可靠性水平。例如,若得到管道的可靠度数值为 0.96,则可以初步断定该管道单元处于较高的可靠性水平,此时,只要执行管道单元日常管理程序,就能确保管道单元正常工作。再对 n 段管道的可用度进行求解,进而按照数值大小进行排序,以确定最危险的管段,对照相应的运行可靠性指标评价等级对其可靠度所处的水平进行量化评估,最后判断稳态的可用度。

3.1.2 压气站单元

压气站单元比管道单元复杂,压气站内部设备多,串并联方式不全相同,需要用可靠性框图^[3]阐述压气站内每个单元之间的逻辑关系。在分析之前,将压气站按输气系统工艺流程分区^[26]——分离区、计量区、收发球区、压气区,并根据各区的流程图,分别绘制其可靠性框图(图2),最后绘制压气站的可靠性框图(图3)。

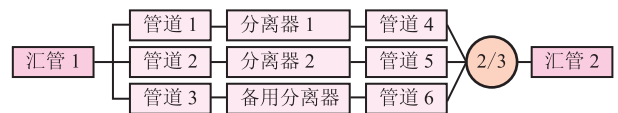


图2 某压气站分离区系统可靠性框图

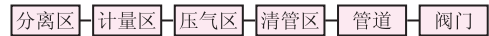


图3 某压气站系统可靠性框图

在完成可靠性框图的基础上,对各个功能区分别采集数据,并按照管道单元的评价步骤,计算压气站内各个功能区的可靠性指标。

3.1.3 干线天然气管道系统

与压气站单元运行可靠性评价相似,首先绘制干线天然气管道可靠性框图(图4),根据输气系统工艺特点求解其可靠性水平。



图4 干线天然气管道可靠性框图

由于管道和压气站串联连接,干线天然气管道系统可靠度为各个单元可靠度之积,各个指标的求解公式如下:

$$R_s(t) = R_i(t) \cdot R_m(t) \cdot R_d(t) \cdot R_p(t) \quad (9)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \mu_s = \frac{\lambda_s}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, A(\infty) = \frac{\lambda_s}{1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (10)$$

式中: $R_s(t)$ 、 $R_i(t)$ 、 $R_m(t)$ 、 $R_d(t)$ 、 $R_p(t)$ 分别为干线天然气管道系统、首站、所有中间站、城市门站、管道的可靠度; λ_s 、 μ_s 、 $A(\infty)$ 分别为干线天然气管道系统的

故障率、修复率及稳态可用度。

最后使用式(4)、式(5)求解干线天然气管道系统的综合可靠性指标。

3.2 确定系统中的薄弱环节

在求解输气管道系统的可靠性水平之后,需要运用故障树分析法确定输气管道系统的薄弱环节^[27-28]。故障树是一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图,其用事件符号、逻辑门符号和转移符号描述系统中各种事件之间的因果关系^[29]。输气管道系统薄弱环节是系统中最可能发生失效的设备或子系统。

故障树顶端是基本事件,如管道失效、压气站失效等,底端是故障最基本原因,如受到SO₂腐蚀等(图5)。在分析过程中,需要求解底事件的重要度,其用于表征故障树底端每种故障原因对顶事件发生的“贡献”。

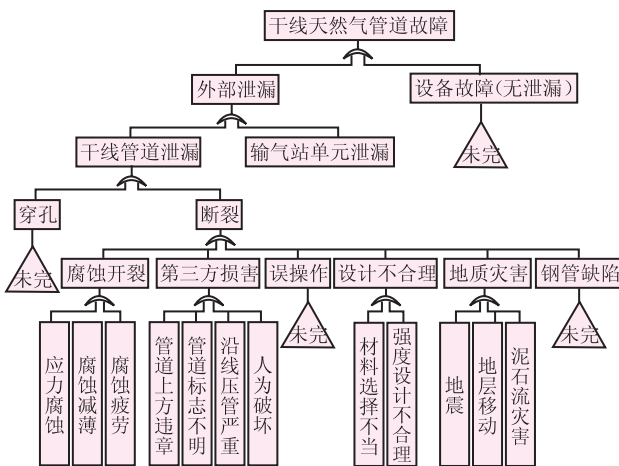


图5 某输气管道系统故障树(部分)^[30]

根据图5,运用故障树定量求解底事件的重要度:

①求解概率重要度^[31],其为顶事件发生概率对基本事件发生概率的偏导数;②求解临界重要度^[29],其为底事件发生概率与顶事件概率的比值乘以概率重要度。重要度对管道维修保护决策具有指导意义,其中概率重要度反映基本事件概率的变化对顶事件概率的贡献,用于找出薄弱环节;临界重要度反映对基本事件采取措施的难易程度,为系统维修或管理提供指导。

4 结束语

提出了一种对干线天然气管道运行可靠性评价的方法。该方法首先将管道系统分为两个主要组成部分——管道单元和压气站单元,并量化每个单元的可靠性水平,在确定各子系统运行可靠性的基础上,研究

管道整体运行可靠性;运用可靠性框图法,建立了系统与各单元之间可靠性关联;运用故障树分析法确定各种因素对管道可靠性的影响大小。这是对干线天然气管道运行可靠性的初步探索,可作为今后深入研究输气系统运行可靠性的参考与指导。建议在今后的干线天然气管道可靠性评价工作中,能够将干线天然气管道的运行状态与供气能力结合起来,整合分析整条天然气干线管道的供气保障能力,并利用管道系统运行模拟软件,提高计算速度与精度。

参考文献:

- [1] 邢志祥. 天然气输送管道风险评估技术研究[J]. 油气储运, 2008, 27(9): 2-5.
- [2] 艾慕阳. 大型油气管网系统可靠性若干问题探讨[J]. 油气储运, 2013, 32(12): 1265-1270.
- [3] 国家电网公司. 电力可靠性理论基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 程五一, 李季. 系统可靠性理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [5] CAGNO E, CARON F, MANCINI M. Using AHP in determining the prior distributions on gas pipeline failures in a robust Bayesian approach[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 28(9): 275-284.
- [6] FAERTES D, SAKER L, VIEIRA F, et al. Reliability modeling-Petrobras 2010 integrated gas supply chain[C]. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, September 27-October 1, 2010.
- [7] DAVIS D A, JESINSKA D A. Evaluation of a risk level of gas supply of the basic countries and risk criteria of UGS[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 20(7): 5-8.
- [8] BARTENEV A M, GELFAND B E, MAKHVILADZE G M. Statistical analysis of accidents on the Middle Asia-Centre gas pipelines[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 46(6): 57-49.
- [9] CABALU H. Indicators of security of natural gas supply in Asia[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 218-225.
- [10] KUCHERYAVYI V I, MILKOV S N. Reliability calculation for curvilinear insert segments of a gas pipeline in the presence of fracture defects[J]. Journal of Machinery and Reliability, 2009, 38(6): 608-611.
- [11] 孙元章, 周家启. 大型互联电网在线运行可靠性的理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

- [12] UZAIR M S. Computerized evaluation of water-supply reliability[J]. IEEB Transaction on Reliability, 1990, 39(1): 35-41.
- [13] ETI M C, OGAJI S T, PROBERT S D. Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station[J]. Applied Energy, 2007, 84(2): 202-221.
- [14] 曲慎扬. 油气管道可靠性评价指标及其计算[J]. 油气储运, 1996, 15(4): 1-4.
- [15] 王勇. 普光输气站定量风险评价技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [16] RYAN W M, JOAN M O, DANIEL S. Assessing reliability in energy supply systems[J]. Energy policy, 2007, 35(4): 2151-2162.
- [17] 常光忠. 中国石油西南油气田分公司玉成输气站 RBI 风险评估报告, EP034792[R]. 奥斯陆: 挪威船级社, 2010.
- [18] 黄维和. 大型天然气管网系统可靠性[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 401-403.
- [19] DONG Y, YU D. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2): 83-88.
- [20] GEORGIOS A P. Major hazard pipelines: A comparative study of onshore transmission accidents[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999(12): 91-107.
- [21] 刘锴, 郑贤斌. 在役油气管道安全可靠性评估方法初探[J]. 油气田环境保护, 2010, 20(4): 48-59.
- [22] BRITO A J, ALMEIDA de A T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 187-198.
- [23] 宋东里, 陈靖华, 严大凡. 天然气管网系统可靠性数据统计方法[J]. 油气储运, 1997, 16(12): 25-29.
- [24] 俞树荣, 马欣, 刘展, 等. 在役长输管道不同时期可靠性安全评价[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(4): 65-67.
- [25] SIGITAS R, ALGIRDAS K, MINDAUGAS V. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems[J]. Applied Energy, 2012, 94(6): 22-33.
- [26] LI Z, PAN X, MA J. Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(6): 4079-4086.
- [27] 姚安林, 赵忠刚, 张锦伟. 油气管道风险评估质量评价技术[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 111-116.
- [28] 董绍华, 韩忠晨, 费凡, 等. 输油气站场完整性管理与关键技术应用研究[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 117-123.
- [29] LAVASANI M R M, WANG J, YANG Z, et al. Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines[J]. Science, 2011, 1(1): 29-42.
- [30] MOHITPOUR M, SZABO J, HARDEVELD T. Pipeline operation & maintenance a practical approach[J]. IMIESA, 2009, 34(9): 53.
- [31] 霍春勇, 董玉华, 高惠临. 长输天然气管线的故障树研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 99-102.
- (收稿日期: 2014-03-06; 修回日期: 2014-03-13; 编辑: 关中原)



作者简介: 张宗杰, 在读硕士生, 1990年生, 2012年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气管网运行与供气可靠性研究。

ZHANG Zongjie, reading master, born in 1990, graduated from China University of Petroleum (Beijing), oil & gas storage and transportation engineering, in 2012, engaged in the research of reliability of operation and gas supply of oil/gas pipeline networks.
Tel: 15652914004, Email: zhangzongjie101010@163.com