

引文: 姚广玉, 郑洪龙, 李大全, 等. 天然气管道系统目标供气可靠度计算方法[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 896-904.

YAO Guangyu, ZHENG Honglong, LI Daquan, et al. Calculation method for target reliability of natural gas pipeline systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 896-904.

天然气管道系统目标供气可靠度计算方法

姚广玉¹ 郑洪龙² 李大全³ 魏然然² 孙巧飞² 杨凯²

1. 陕西延长石油(集团)管道运输公司; 2. 国家管网集团科学技术研究总院分公司; 3. 中国石油尼日尔公司

摘要:【目的】天然气管道系统是由众多单元组成的大型、复杂及开放系统, 确保安全可靠运行显得尤为重要。随着管道系统可靠性研究的不断深入, 系统可靠性指标体系逐渐完善, 但尚缺乏有效的系统目标可靠度计算方法, 严重制约了天然气管道系统可靠性评价方法的工程实际应用。【方法】提出了一种基于单元可接受风险的天然气管道系统目标供气可靠度计算方法, 其包括单元目标可靠度与系统目标供气可靠度两个部分: 根据风险可接受准则与风险后果计算方法, 构建了基于社会风险与个人风险的管道单元目标可靠度确定模型; 考虑天然气管道系统关键单元具有随机失效、气源与用户需求随机波动的特性, 构建了基于蒙特卡洛模拟的供气可靠度评价方法, 并结合单元目标可靠度计算结果, 确定天然气管道系统的目标供气可靠度。【结果】将新建的计算方法应用于中国某天然气管道系统, 得到该系统目标供气可靠度为 0.999 383, 将其与基于历史数据统计方法得到的实际供气可靠度 0.999 404 进行对比, 评估得出该天然气管道系统可靠度高于目标供气可靠度, 能够安全、高效地完成管输任务。【结论】通过实例应用验证了新建计算方法应用于天然气管道系统目标供气可靠度评价的可行性, 为后续天然气管道系统可靠性提升与优化研究奠定了技术基础。(图 5, 表 3, 参 30)

关键词: 天然气管道; 供气能力; 管输任务; 目标可靠度; 社会风险; 个人风险

中图分类号: F426; TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)08-0896-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.006

Calculation method for target reliability of natural gas pipeline systems

YAO Guangyu¹, ZHENG Honglong², LI Daquan³, WEI Ranran², SUN Qiaofei², YANG Kai²

1. Yanchang Petroleum Group Pipeline Company; 2. PipeChina Institute of Science and Technology; 3. CNPC Niger Company

Abstract: 【Objective】The natural gas pipelines are large-scale, intricate, and open systems composed of multiple units, with a specialized focus on ensuring safe and reliable operation. Intensive research on pipeline system reliability has been conducted, gradually improving the system reliability index system and evaluation methodology. Nonetheless, the efficient determination method is still absent, having a significant impact on the practical engineering applications of the established reliability evaluation methods for natural gas pipeline systems. 【Methods】This paper introduces an approach to determine the target gas supply reliability of natural gas pipeline systems by assessing acceptable risks within their units. The methodology encompasses two key aspects: unit target reliability and system target gas supply reliability. To achieve this, a model for determining the target reliability of pipeline units has been constructed, incorporating both social and individual risks based on risk acceptability criteria and risk consequence calculation methods. Additionally, an evaluation method for gas supply reliability, utilizing a Monte Carlo simulation approach, has been developed. This method takes into account the random failures in crucial units of natural gas pipeline systems and the random fluctuations in gas sources and users' demands. By integrating these evaluation outcomes with the results of unit target reliability calculations, the target gas supply reliability of natural gas pipeline systems can be determined. 【Results】The proposed determination approach was applied to a natural gas pipeline system in China, yielding a target gas supply reliability of 0.999 383. By comparing it with the actual reliability of gas supply recorded at 0.999 404 through the statistics method on historical data, the evaluation demonstrated that this natural gas pipeline system surpassed the target gas supply reliability, indicating its capability to ensure safe and efficient pipeline transmission. 【Conclusion】The viability of the proposed determination methodology in evaluating the target gas supply reliability of natural gas pipeline systems has been verified through an application case. The study findings

establish a technical groundwork for future studies focused on reliability improvement and optimization for natural gas pipeline systems. (5 Figures, 3 Tables, 30 References)

Key words: natural gas pipeline, gas supply capacity, pipeline transmission, target reliability, social risk, individual risk

天然气作为清洁高效的化石能源,是向新能源转换的桥梁,在能源结构中的占比逐渐增大。天然气管道系统作为连接天然气气源与下游市场的重要纽带,其可靠运行直接关系到天然气的安全稳定供应^[1-5]。管道系统可靠性评价技术是对管网安全稳定运行程度及用户供气保障程度的定量分析。近年来,国内外学者对天然气管道系统的可靠性评价技术进行了大量研究^[6-11],但主要集中于系统可靠性指标体系建立与指标计算等方面,针对目标可靠度的研究相对滞后。目标可靠度的缺失将会导致系统可靠性缺乏参照值,难以对当前系统的可靠性进行评价,致使天然气管道系统可靠性评价技术在实际工程应用中存在困难。因此,确定天然气管道系统的目标可靠度尤为重要。

自20世纪60年代以来,为了提高油气管道的使用寿命,国内外开展了管道单元的目标可靠度研究^[1-3,6-16]。天然气管道单元目标可靠度的确定方法主要分为基于历史数据统计与基于风险分析两种。基于历史数据的统计方法是通过对管道失效数据库进行统计分析,得到天然气管道的平均年失效概率,并对其进行修正,从而得到最大允许失效概率。基于该方法,DNV-RP-F101-2017《腐蚀管道缺陷评价技术》、ISO 16708-2006《石油和天然气工业管道输送系统基于可靠性的极限状态法》等给出了不同失效原因下管道单元目标可靠度的规定^[12-13]。DNV-RP-F101-2017将管道的安全等级分为非常高、高、中等及低4个等级,并设置相应的最大可接受失效概率(即目标可靠度)为 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-4} 及 10^{-3} 。此外,Hassanien等^[14]提出了一种半定量的目标可靠度确定方法,先通过管道历史运行数据统计结果评估管道单元失效概率,再基于历史失效事件修正失效概率确定目标可靠度。然而,基于历史数据的统计方法未充分利用管道单元当前的基本信息与运行参数,因此,部分研究者提出了基于风险的管道单元目标可靠度确定方法^[14-19]。根据风险的基本定义,Zimmerman等^[15-17]认为不同风险的失效后果计算方法不同,可接受程度也不同,提出了兼顾社会风险与个人风险的管道单元目标可靠度确定方法,并根据管道压力、直径、人口密度等数据拟合得到目标可靠度的计算公式。Zhang等^[18-19]分别采用固定预期风险、将

F-N曲线作为个人风险与社会风险的可接受准则,提出了适用于中国陆上天然气管道单元的目标可靠度确定公式,并将其应用于天然气管道系统设计阶段。

上述方法仅适用于天然气管道单元的目标可靠度确定,尚不适用于整个天然气管道系统。与管道单元不同,天然气管道系统是指干线天然气长输管道及其配套储气调峰设施等单元组成的大型基础设施,其系统供气可靠度定义为在规定的时间内与条件下完成规定的输气任务能力,目标供气可靠度则是指供气可靠度的预期值。为此,基于“自下而上”的方法,提出了一种基于单元可接受风险的天然气管道系统目标供气可靠度确定方法,以期天然气管道系统科学管理提供优化思路。

1 天然气管道单元目标可靠度

1.1 基于风险的目标可靠度计算方法

在天然气管道系统的运行过程中,存在着个人风险与社会风险。其中,个人风险是指因天然气管道各种潜在的火灾、爆炸、气体泄漏事故造成区域内某一固定位置人员的个体死亡概率,即单位时间内(通常为一年)的个体死亡率;社会风险是对个人风险的补充,指群体(包括管道周边企业员工与公众)在危险区域承受某种程度伤害的频发程度,其为事故发生概率与伤亡人数之积。基于风险理论可以计算管道的目标可靠度,该方法中风险 r 的基本定义为:

$$r = P_B c \quad (1)$$

式中: P_B 为管道每千米每年的失效概率; c 为管道失效造成的后果。

根据式(1),管道最大允许失效概率 $P_{B, \max}$ 计算式为:

$$P_{B, \max} = \frac{r_{\max}}{c} \quad (2)$$

式中: r_{\max} 为管道最大可接受风险。

根据式(2),可以得到天然气管道单元目标可靠度 R_B 的计算式为:

$$R_B = 1 - \frac{r_{\max}}{c} \quad (3)$$

式(3)表明天然气管道单元目标可靠度 R_B 为失效后果 c 与最大可接受风险 r_{max} 的函数,其中 r_{max} 可通过单元风险可接受准则确定, c 则采用风险后果评估模型获得。根据社会风险与个人风险可以确定两个目标可靠度,为了同时满足两类风险的可接受准则,天然气管道单元目标可靠度将取两类风险的最大值:

$$R_B = \text{MAX}\{R_{B_i}\} \quad (i=1,2) \quad (4)$$

式中: R_{B_i} 为第 i 类(当 $i=1$ 时,为社会风险;当 $i=2$ 时,为个人风险)风险下管道单元的目标可靠度。

1.2 天然气管道失效风险可接受准则

风险可接受准则表示在规定的时间内或系统的某一行为阶段内,社会公众、企业、政府等对风险水平的接受程度,其为风险分析、制定降低风险的措施提供了参考依据^[20-21]。常见的风险可接受准则包括 F-N 曲线、固定期望风险的可接受准则。

1) F-N 曲线。F-N 曲线常作为社会风险可接受准则,其表达式为:

$$1 - F_N(x) < \frac{a}{x^n} \quad (5)$$

式中: N 为死亡人数,人; $F_N(x)$ 为每年死亡人数 x 的分布函数; n 为风险极限曲线的斜率; a 为常数,其决定风险极限曲线的位置。

2) 固定期望风险可接受准则。根据风险的定义,可以得到大概率、低后果事件与小概率、高后果事件的风险相同。固定期望风险可接受准则即是指选取一个固定值作为风险是否可接受的判断依据。

基于 F-N 曲线可接受准则,存在这样的情况:在人口稀少地区,天然气管道的失效概率接近但未超过最大允许失效概率,其社会风险虽然可以接受,但风险却集中在少数未被充分保护的个人的身上,此时应用 F-N 曲线可接受准则存在不足。因此,固定期望风险可接受准则仅适用于个人风险评估^[22-23]。

1.3 天然气管道单元目标可靠度的确定

根据式(1)~式(3),天然气管道单元目标可靠度的确定需要计算管道单元的失效后果。管道单元的失效后果与失效类型相关,为了更保守地确定天然气管道单元目标可靠度,选取管道失效类型为断裂失效进行分析,失效后果为泄漏天然气燃爆造成的人员伤亡。基于此,社会风险与个人风险的失效后果计算式分别为:

$$c_1 = P_E A \rho \tau \quad (6)$$

$$c_2 = P_E L \tau \quad (7)$$

式中: c_1 为社会风险后果(即死亡人数),人; P_E 为点火概率; ρ 为人口密度,人/km²; A 为事故影响面积, m²; τ 为事故发生时人员在管道周边的概率; c_2 为个人风险后果(即个体死亡概率); L 为相互作用长度(即管道事故发生后,对某点产生影响的管道长度),m。

仅考虑管道断裂失效情况下,在式(6)、式(7)中事故影响面积、相互作用长度是压力、管道直径的函数,点火概率也可假设为管道直径的函数。因此,为了方便天然气管网干线管道单元社会风险与个人风险计算, Zhang 等^[19]将式(6)、式(7)简化为人口密度、管道运行压力与直径的函数,其表达式为:

$$c_1 = 4.07 \times 10^{-10} \rho p D^3 \quad (8)$$

$$c_2 = 7.86 \times 10^{-8} \sqrt{p} D^2 \quad (9)$$

式中: D 为管径, mm; p 为管道运行压力, MPa。

综上,根据社会风险与个人风险的后果计算模型、风险可接受准则,可确定两类风险的管道单元目标可靠度;再根据式(4),即可确定管道单元目标可靠度。

2 天然气管道系统目标供气可靠度

天然气管道系统是由众多单元组成的大型、复杂及开放系统^[4,24-25],各单元之间的功能相互耦合,且整个系统与外界环境密切相关。当天然气管道单元目标可靠度确定之后,为了确定整个系统目标供气可靠度,需要构建天然气管道系统供气可靠度评价模型。天然气管道系统供气可靠度评价模型主要包括系统供气可靠性指标构建、单元可靠性评估、用户需求预测、状态转移模型与供气量计算模型建立、系统供气可靠性计算 6 个部分。

2.1 系统供气可靠性指标构建

天然气管道系统供气可靠性是指系统在规定时间内与条件下满足用户用气需求的能力。从气量维度,建立天然气管道系统供气可靠性指标,其表达式为:

$$R_G = \frac{\sum_{h=1}^T I_h}{T} \quad (10)$$

$$I_h = \begin{cases} 1, & \sum_{k=1}^K X_{h,k} \geq \sum_{k=1}^K Q_{h,k} \\ \frac{\sum_{k=1}^K X_{h,k}}{\sum_{k=1}^K Q_{h,k}}, & \sum_{k=1}^K X_{h,k} < \sum_{k=1}^K Q_{h,k} \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_G 为天然气管道系统供气可靠度; T 为评价周期; d ; $X_{h,k}$ 为第 h 天第 k 个用户的供气量, 10^4 m^3 ; $Q_{h,k}$ 为第 h 天第 k 个用户的需求量, 10^4 m^3 ; K 为需求用户的总数。

在评价过程中,受到资源不确定性、系统单元不确定性以及用户需求不确定性的影响,系统供气量、用户需求是随机的。

2.2 单元可靠性评估

根据天然气管道系统完成输气任务的功能,将天然气管道系统主要划分为天然气气源单元、管道单元、压缩机单元^[26]。考虑管道单元的随机失效与维修措施的影响,系统可靠度评估模型需要输入各个单元的失效率与维修率参数,因此单元可靠性评估方法如下:

1) 管道与压缩机单元。管道与压缩机是天然气管道系统主要组成部分,该单元的失效将导致天然气管道系统的供气能力大大降低。仅考虑单元的完全失效与正常运行两种状态,天然气管道与压缩机单元的可靠性评估可基于历史失效数据分析来确定^[27]。

2) 天然气气源单元。气源的不确定性对整个系统供气可靠性有非常显著的影响,因此将天然气气源作为管道系统的一个独立单元进行系统可靠性评价^[28]。天然气管道的上游资源类型可分为油气田、管道气、LNG接收站,上游资源的供气能力受气候、设施等因素的影响会发生变化。为了简化上游资源的可靠性模型,忽略上游资源供气能力降低的情况,假定上游资源供气状态仅有正常供气与中断供气两种模式。因此,天然气气源的可靠性评估也可基于历史失效数据分析来确定。

2.3 用户需求预测

天然气管道系统的用户主要分为城镇燃气用户、工业用户、电厂用户及商业用户 4 类。对用气需求进行预测时,首先需要考虑不同类型用户有不同的用气特点,通过需求侧分析得到用户的特征;然后,采用时间序列模型、支持向量机模型、长短期记忆网络模型对各类用户的天然气需求进行预测^[9]。

2.4 天然气管道系统状态转移模拟

天然气管道系统随着运行时间的增加,系统单元可能发生随机失效,导致天然气管道系统的运行状态发生改变。为了预测系统在运行过程中可能出现的失效情况,进而分析系统在不同运行状态下的供气能力,基于序贯蒙特卡洛方法构建系统状态转移模型。

天然气管道系统运行状态是管道与压缩机单元、

气源单元等各关键单元状态的排列组合,且系统状态随着时间的推移而发生随机的转移。设 S 为天然气管道系统所有的运行状态,假定天然气管道在 t' 时刻转移到当前运行状态 $S_0=s_u$,那么系统在 t 时刻发生下一次转移的条件概率为 $P'(t|t', S_0=s_u)$,转移到下一状态 $S_1=s_v$ 的条件概率为 $P''(S_1=s_v|t, S_0=s_u)$ 。因此,天然气管道系统在 t 时刻转移到状态 $S_1=s_v$ 的概率 P_W 的表达式为:

$$P_W(t, S_1=s_v|t', S_0=s_u) = P'(t|t', S_0=s_u) P''(S_1=s_v|t, S_0=s_u) \quad (12)$$

式中: s_u 、 s_v 分别为天然气管道系统状态发生转移前、后的两种不同运行状态,且 $s_u \neq s_v$ 。

由于天然气管道系统状态空间庞大,因此采用序贯蒙特卡洛方法对天然气管道系统状态转移进行模拟。序贯蒙特卡洛模拟的步骤为:①从条件概率 $P'(t|t', S_0=s_u)$ 中采样转移时间 t ;②从条件概率 $P''(S_1=s_v|t, S_0=s_u)$ 中采样,得到状态 $S_1=s_v$;③重复上述步骤直到转移时间大于任务时间,从而得到评价周期内天然气管道的各运行状态、状态的转移时刻及持续时间(图 1)。

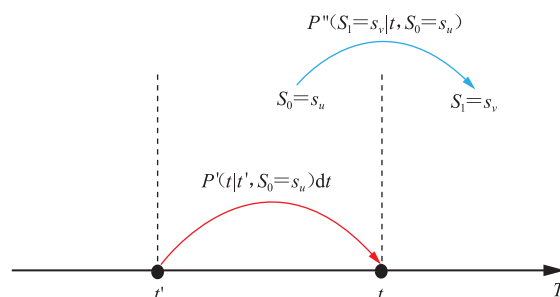


图 1 天然气管道系统随机状态转移示意图
Fig. 1 Schematic diagram of random state transition of natural gas pipeline system

2.5 天然气管道供气能力计算

天然气管道系统的状态直接影响着下游用户能否获得所需气量,当系统发生状态转移之后,系统的供气量也会随之发生改变。由于天然气具有可压缩性,天然气系统内的管存能够继续作为气源供给下游用户,即管存效应。

基于序贯蒙特卡洛模拟获得评价周期内不同时段的天然气管道运行状态之后,再采用 SPS 软件对天然气管道系统转移到不同状态的供气流量变化进行计算,即可得到输气任务时间内各个用户实际的供气量。同时,该系统的大时滞与非线性也可以在 SPS 软件中得以体现。值得注意的是,当系统发生状态转移时,保障系统正常供气是运行调控的重要原则。为了实现这

个目标,天然气管道系统会经历控流阶段与控压阶段两个阶段。在控流阶段,每一个供气点需保持输量等于任务供气量,而供气点的压力将逐渐降低。在压力降至设定的最低压力时,则需要进入控压阶段。在控压阶段,每一个供气点需保持设定的最低压力,使得供气点的流量逐渐降低,直至达到该运行状态下的稳定供气量或发生新的状态转移^[29-30]。

2.6 天然气管道系统目标供气可靠性计算

考虑到天然气管道供气能力的不确定性,基于 M 次蒙特卡洛模拟,对天然气管道供气可靠度的期望值进行评估。根据天然气管道系统可靠度评价模型,以天然气管道单元目标可靠度为基础,考虑系统各单元之间的功能耦合与水力特性,从单元生产安全角度出发,确定天然气管道系统的目标供气可靠度(图2,其中 $R_G(b)$ 为第 b 次模拟的天然气管道系统目标供气可靠度)。

当进行序贯蒙特卡洛模拟时,首先输入单元可靠性参数,模拟系统在评价周期内的状态转移;然后,采用天然气需求预测模型对用户的用气需求进行预测;随后,根据管道系统状态及用户需求量,基于SPS软件仿真得到系统的供气量。根据式(10)计算系统单次蒙特卡洛模拟的目标供气可靠度:

$$R_G = \frac{\sum_{b=1}^M R_G(b)}{M} \quad (13)$$

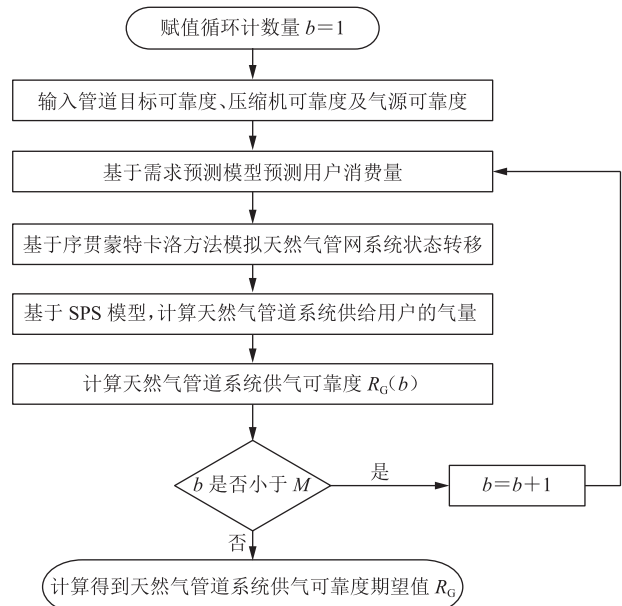


图2 天然气管道系统目标供气可靠度计算流程图
Fig. 2 Flow chart for determination of target reliability of natural gas pipeline system

3 实例应用

选取中国某天然气长输管道系统为例,该管道管径 1 219 mm、壁厚 22 mm、设计压力 12 MPa,包含 6 个压气站、46 个截断阀室、3 个分输站、1 个末站、1 个气源、11 个分输用户(图3、表1~表2),气源最大供气能力为 2 043 m³/d。

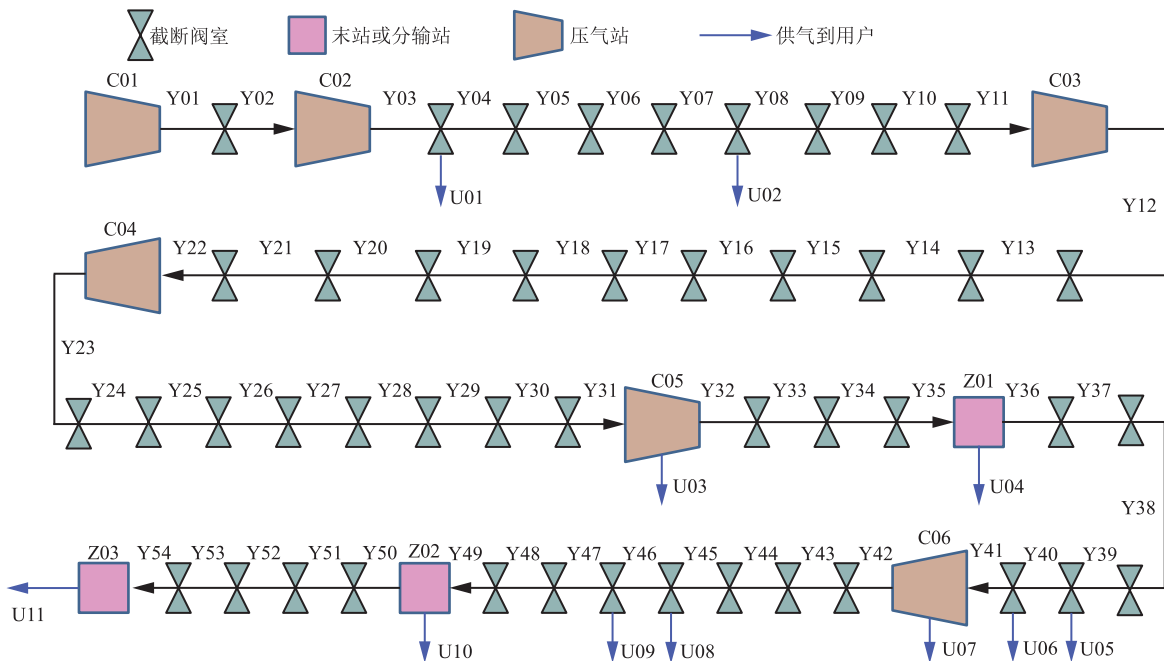


图3 某天然气管道系统组成示意图
Fig. 3 Schematic diagram of composition of a natural gas pipeline system

表1 某天然气管道系统6个压气站配置表

Table 1 Configuration of 6 compressor stations of a natural gas pipeline system

压气站	压气站位置/km	配置信息
C01	0	1用1备
C02	33	3用1备
C03	261	3用1备
C04	474	3用1备
C05	665	3用1备
C06	847	2用1备

注:压气站位置是指相对首站距离。

表2 某天然气管道系统11个分输点需求量及压力约束表

Table 2 Demand and pressure constraints at 11 offtake points of a natural gas pipeline system

消费用户	分输点位置/km	需求流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	最低压力/MPa
U01	57	16	4
U02	162	75	4
U03	665	49	4
U04	734	2	4
U05	819	6	4
U06	839	7	4
U07	847	46	4
U08	914	7	4
U09	928	6	4
U10	975	150	4
U11	1063	1679	4

注:分输点位置是指相对首站距离。

3.1 管道单元目标可靠度计算

根据该天然气管道系统各管段基本信息(表3),采用上述基于风险的目标可靠度计算方法,利用式(1)~式(9)求得54个管段的目标可靠度(图4)。可

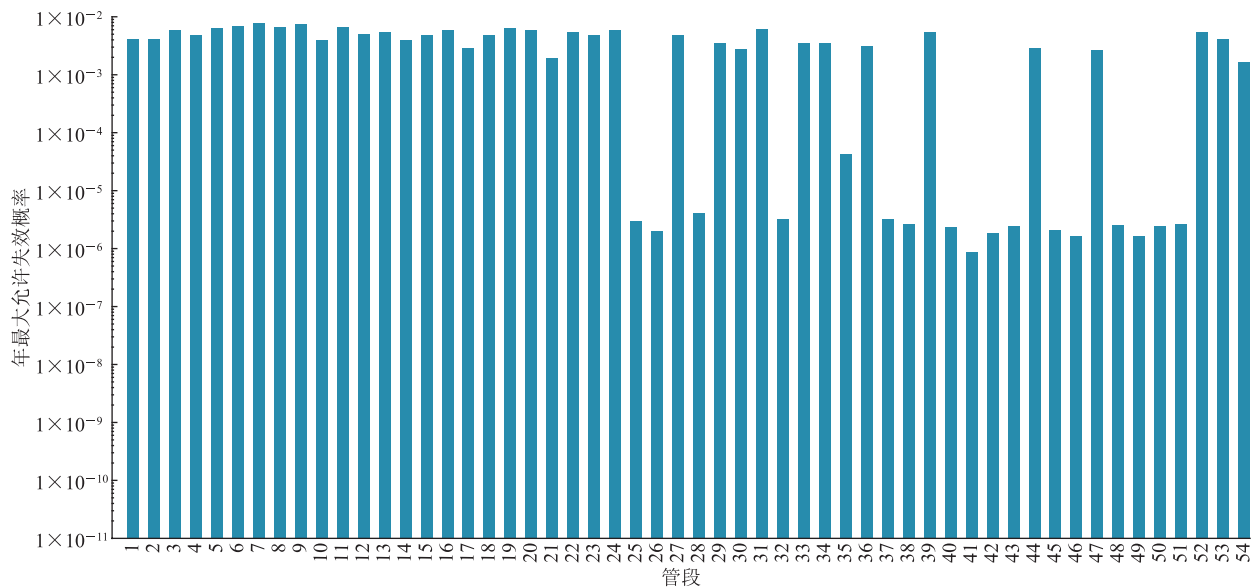


图4 某天然气管道系统54个不同管段目标可靠度计算结果图

Fig. 4 Target reliability calculation results of 54 sections in a natural gas pipeline system

表3 某天然气管道系统管道长度、周围人口密度及地区等级信息表

Table 3 Section lengths, affected population densities, and location classes of a natural gas pipeline system

管段	长度/km	人口密度/(人·km ⁻²)	地区等级	管段	长度/km	人口密度/(人·km ⁻²)	地区等级
Y01	16.40	4	一	Y28	35.04	330	二
Y02	16.90	4	一	Y29	14.35	4	一
Y03	23.91	4	一	Y30	11.21	4	一
Y04	19.75	4	一	Y31	24.65	4	一
Y05	26.35	4	一	Y32	27.64	330	二
Y06	27.84	4	一	Y33	14.23	4	一
Y07	31.28	4	一	Y34	14.14	4	一
Y08	26.57	4	一	Y35	12.60	330	二
Y09	29.86	4	一	Y36	12.60	4	一
Y10	16.24	4	一	Y37	27.99	330	二
Y11	26.59	4	一	Y38	22.79	330	二
Y12	20.04	4	一	Y39	22.04	4	一
Y13	22.30	4	一	Y40	20.24	330	二
Y14	16.21	4	一	Y41	7.49	330	二
Y15	19.25	4	一	Y42	16.01	330	二
Y16	24.08	4	一	Y43	21.19	330	二
Y17	11.75	4	一	Y44	11.82	4	一
Y18	19.74	4	一	Y45	17.92	330	二
Y19	25.83	4	一	Y46	14.26	330	二
Y20	23.92	4	一	Y47	10.67	4	一
Y21	7.70	4	一	Y48	22.01	330	二
Y22	21.88	4	一	Y49	14.24	330	二
Y23	19.77	4	一	Y50	20.96	330	二
Y24	23.71	4	一	Y51	22.22	330	二
Y25	25.70	330	二	Y52	21.98	4	一
Y26	17.42	330	二	Y53	16.40	4	一
Y27	19.44	4	一	Y54	6.73	4	一

见,该管道途经地区为第一、二类地区,其中一类地区管道最大允许失效概率更高,这是由于管道沿线人口较少,社会风险与个人风险均较小;二类地区管道最大允许失效概率较前者小两个数量级,主要原因是人口密度更大。

3.2 管道系统目标供气可靠度计算

根据上述天然气管道系统目标供气可靠度评价模型,基于历史失效数据统计方法,可以得到:压缩机单元、气源的失效率分别为 0.675 0 次/a、0.012 2 次/a;管道单元、压缩机单元及气源单元的维修率分别为 120 次/a、219 次/a 及 52.14 次/a^[24]。需要说明的是,气源维修率是基于管道系统历史失效数据,采用统计方法分析气源平均中断时间量化获得的。其中,天然气管道单元的失效率 λ 可根据年最大失效概率进行计算,其表达式为:

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{1}{1 - P_{B, \max}} \right) \quad (14)$$

该管道系统目标供气可靠度的评价周期假定为 1 年,蒙特卡洛模拟次数为 50 000 次,根据上述天然气管道系统目标供气可靠度确定模型,计算得到系统目标供气可靠度为 0.999 383。此外,为了对比天然气管道系统当前供气可靠度,采用历史失效统计方法得到该管道单元失效率为 1.2×10^{-4} 次/(km·a),从而计算得到该系统的实际供气可靠度为 0.999 404。将各用户的目标供气可靠度与实际供气可靠度(图 5)对比可见,各个用户的实际供气可靠度均高于目标供气可靠度。由此,可以判断该天然气管道系统完成规定输气任务的能力达到了目标值,尚无需对系统采取可靠性提升措施。

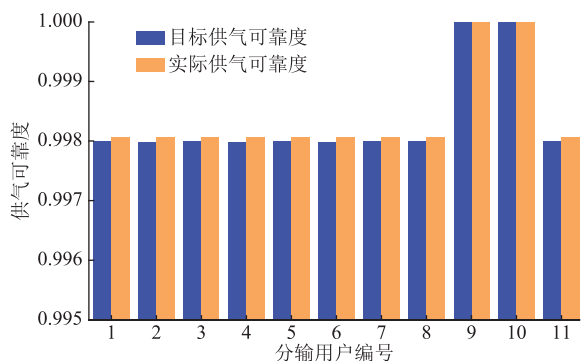


图 5 某天然气管道系统目标供气可靠度与实际供气可靠度对比图

Fig. 5 Comparison between target and actual reliability of gas supply for a natural gas pipeline system

4 结论

1) 随着能源市场的不断发展,天然气管道的安全性与可靠性受到越来越多的关注。基于单元可接受风险的天然气管道系统目标供气可靠度计算方法充分考

虑天然气管道的水力特性、单元的失效与维修行为,为管道系统可靠性评价提供了判据,进而为管道安全运维决策提供了依据。

2) 将该方法应用于某天然气长输管道系统,将目标供气可靠度与实际供气可靠度进行对比,验证了新建计算方法的可行性,为后续管道可靠性评价技术的广泛应用奠定了基础。

3) 需要注意的是,在新构建的天然气管道系统目标可靠度计算方法中,将天然气管道系统分为了管道与压缩机单元进行研究,由于压缩机的高可靠度与冗余度,假设压缩机单元相关风险均可接受。但这一假设并不适用于所有压气站,当压缩机组可靠性较低或压气站中未设置备用压缩机组时,应引入压缩机单元的目标可靠度确定方法,提高该计算方法的精度与适用性。

参考文献:

[1] 黄维和. 大型天然气管网系统可靠性[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 401-404. DOI: 10.7623/syxb201302026.
HUANG W H. Reliability of large-scale natural gas pipeline network[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 401-404.

[2] 李明菲, 薛向东, 马健, 郑宇恒, 薛鲁宁, 郑洪龙, 等. 复杂天然气管网系统运行期可靠性评价体系[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 738-744. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.07.003.
LI M F, XUE X D, MA J, ZHENG Y H, XUE L N, ZHENG H L, et al. A reliability evaluation system of complex gas pipeline network system in the operation period[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 738-744.

[3] 温凯, 张文伟, 宫敬, 李恒东, 张振永, 赵博渊. 天然气管道可靠性的计算方法[J]. 油气储运, 2014, 33(7): 729-733. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.07.009.
WEN K, ZHANG W W, GONG J, LI H D, ZHANG Z Y, ZHAO B Y, et al. Computation of gas pipeline reliability[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(7): 729-733.

[4] 虞维超, 李熠辰, 王珩宇, 赵洪洋, 王子轩, 林聿明, 等. 考虑需求侧影响的天然气管网事故工况流量分配方法[J]. 油气储运, 2023, 42(2): 223-230. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.02.012.
YU W C, LI Y C, WANG H Y, ZHAO H Y, WANG Z X, LIN Y M, et al. Gas flow allocation method for natural gas pipeline network under accident conditions considering demand side effect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(2): 223-230.

- [5] YIN X, WEN K, WU Y, HAN X, MUKHTAR Y, GONG J. A machine learning-based surrogate model for the rapid control of piping flow: application to a natural gas flowmeter calibration system[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 98: 104384. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104384.
- [6] 苏怀,张劲军,杨楠,张宗杰.大型天然气管网可靠性评价方法研究进展[J].*油气储运*,2016,35(1):7-15. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2016.01.002.
- SU H, ZHANG J J, YANG N, ZHANG Z J. Research on reliability assessment methods for large gas pipeline network[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(1): 7-15.
- [7] 虞维超,黄维和,宫敬,温凯,李熠辰,党富华,等.天然气管网系统可靠性评价指标研究[J].*石油科学通报*,2019,4(2):184-191. DOI:10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.017.
- YU W C, HUANG W H, GONG J, WEN K, LI Y C, DANG F H, et al. Research into a reliability evaluation index of natural gas pipeline network systems[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(2): 184-191.
- [8] CHEN Q, ZUO L L, WU C C, CAO Y K, BU Y R, CHEN F, et al. Supply reliability assessment of a gas pipeline network under stochastic demands[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 209: 107482. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107482.
- [9] LI Y C, GONG J, YU W C, HUANG W H, WEN K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management[C]. *Virtual: ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference*, 2020: V008T08A024.
- [10] SU H, ZIO E, ZHANG J J, LI X Y, CHI L X, FAN L, et al. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, 131: 106584. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106584.
- [11] YU W C, HUANG W H, WEN Y H, LI Y C, LIU H F, WEN K, et al. An integrated gas supply reliability evaluation method of the large-scale and complex natural gas pipeline network based on demand-side analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 212: 107651. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107651.
- [12] DNV GL. Corroded pipelines: DNVGL-RP-F101-2017[S]. Oslo: DNV GL, 2017: 11.
- [13] International Organization for Standardization. Petroleum and natural gas industries-pipeline transportation systems-reliability-based limit state methods: ISO 16708:2006[S]. Geneva: ISO, 2006: 1-57.
- [14] HASSANIEN S, LEBLANC L, NEMETH A. Towards an acceptable pipeline integrity target reliability[C]. Calgary: 2016 11th International Pipeline Conference, 2016: V002T07A015.
- [15] ZIMMERMAN T, NESSIM M, MCLAMB M, ROTHWELL B, ZHOU J, GLOVER A. Target reliability levels for onshore gas pipelines[C]. Calgary: 2002 4th International Pipeline Conference, 2002: 845-854.
- [16] NESSIM M, ZHOU W X, ZHOU J, ROTHWELL B, MCLAMB M. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines[C]. Calgary: 2004 International Pipeline Conference, 2004: 2501-2512.
- [17] NESSIM M, ZHOU W X, ZHOU J, ROTHWELL B. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2009, 131(6): 061701. DOI: 10.1115/1.3110017.
- [18] ZHANG J Y, ZHANG Z Y, YU Z F, WU W, CHEN Y S. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline[C]. Calgary: 2014 10th International Pipeline Conference, 2014: V003T12A005.
- [19] ZHANG Z Y, ZHOU Y W, ZHANG J Y. Assessment on design factors of China's natural gas pipeline based on reliability-based design method[C]. Calgary: 2016 11th International Pipeline Conference, 2016: V002T07A006.
- [20] 尤秋菊,樊建春,朱伟,白永强.天然气管网系统风险评估[J].*油气储运*,2013,32(8):834-839. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2013.08.008.
- YOU Q J, FAN J C, ZHU W, BAI Y Q. Risk assessment of natural gas pipeline networks[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(8): 834-839.
- [21] 杨燕鹏,罗云,曾珠,宋继红,高继轩.压力管道社会风险可接受准则研究[J].*中国安全科学学报*,2014,24(9):128-133. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2014.09.008.
- YANG Y P, LUO Y, ZENG Z, SONG J H, GAO J X. Research on acceptable criteria of pressure pipeline social risk[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(9): 128-133.
- [22] 戴联双,郑洪龙,程五一,张华兵.油气管道风险可接受准则与指标模型[J].*油气储运*,2009,28(8):1-4. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2009.08.001.

- DAI L S, ZHENG H L, CHENG W Y, ZHANG H B. Risk acceptability criterion and index model for oil and gas pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2009, 28(8): 1-4.
- [23] 张振永, 白芳. 基于可靠性的天然气管道设计和评价技术[J]. *油气与新能源*, 2021, 33(6): 68-74. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2021.05.013.
- ZHANG Z Y, BAI F. Design and evaluation technology of natural gas pipeline based on reliability[J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(6): 68-74.
- [24] 虞维超. 基于需求侧分析的天然气管网供气可靠性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- YU W C. Study on the gas supply reliability of natural gas pipeline networks based on demand side analysis[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [25] 宫敬, 史博会, 李晓平, 虞维超, 吴海浩. 油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用及展望[J]. *油气储运*, 2023, 42(9): 988-997. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.004.
- GONG J, SHI B H, LI X P, YU W C, WU H H. Application of oil and gas pipeline network simulation technologies in construction of intelligent pipeline network and its prospect[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(9): 988-997.
- [26] 宫敬, 徐波, 张微波. 中俄东线智能化工艺运行基础与实现的思考[J]. *油气储运*, 2020, 39(2): 130-139. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.002.
- GONG J, XU B, ZHANG W B. Thinking on the basis and realization of intelligent process operation of China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(2): 130-139.
- [27] GONG C Q, GUO S H, ZHANG R, FRANGOPOL D M. Prediction of burst pressure of corroded thin-walled pipeline elbows subjected to internal pressure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 199: 111861. DOI: 10.1016/j.tws.2024.111861.
- [28] SHAN X Y, YU W C, GONG J, HUANG W H, WEN K, WANG H, et al. A methodology to evaluate gas supply reliability of natural gas pipeline network considering the effects of natural gas resources[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109431. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109431.
- [29] 张敏, 刘明君, 董增寿. 随机应力影响下埋地天然气管道可靠性评估方法研究[J]. *工业安全与环保*, 2023, 49(5): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2023.05.009.
- ZAHNG M, LIU M J, DONG Z S. Reliability evaluation method of buried natural gas pipeline under random stress[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2023, 49(5): 39-43.
- [30] 王慧平, 曾伟. 外径和壁厚的制造偏差对管道可靠度的影响[J]. *天然气与石油*, 2023, 41(4): 34-40. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2023.04.006.
- WANG H P, ZENG W. Effect of deviation from manufacturing tolerances of the outer diameter and wall thickness on pipeline reliability[J]. *Natural Gas and Oil*, 2023, 41(4): 34-40.

(编辑: 李在蓉)

基金项目: 国家管网集团科学研究与技术开发项目“管网系统可靠性深化研究与应用”, WZXGL202108。

作者简介: 姚广玉, 男, 1981年生, 高级工程师, 2015年硕士毕业于西北大学工商管理专业, 现主要从事油气储运工艺与管道完整性管理等方面的研究工作。地址: 陕西省延安市宝塔区枣园路延长石油大厦, 716099。电话: 15991513080。Email: 362605408@qq.com

通信作者: 郑洪龙, 男, 1973年生, 高级工程师, 2005年博士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系统可靠性研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道51号, 065000。电话: 13483606595。Email: zhenghl01@pipechina.com.cn

- Received: 2024-05-16
- Revised: 2024-05-26
- Online: 2024-06-05

