

引文:虞维超, 闪向营, 王凯鸿, 等. 基于用户满意度的天然气管网目标可靠度确定方法[J]. 油气储运, 2025, 44(8): 941–951.

YU Weichao, SHAN Xiangying, WANG Kaihong, et al. A method to determine the target reliability of gas supply in natural gas pipeline networks based on user satisfaction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(8): 941–951.

基于用户满意度的天然气管网目标可靠度确定方法

虞维超¹ 闪向营² 王凯鸿¹ 李熠辰³ 蓝文² 门扬² 宫敬²

1. 国家管网集团油气调控中心; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院; 3. 国家管网集团西气东输分公司

摘要:【目的】天然气管网作为天然气供应链的关键环节,是天然气生产、贸易、储存及销售的重要纽带,确定天然气管网目标可靠度是提升天然气管网安全、平稳、高效运行水平的前提,但当前天然气管网系统可靠性研究多集中于可靠性指标与供气可靠性计算方法的构建,对于管网目标可靠度设定的研究较少,且未考虑用户用气需求及用气特征。【方法】基于用户满意度,新建了天然气管网目标可靠度确定方法:建立天然气管网用户满意度的指标体系,主要由气量满意度、压力满意度、气质满意度、供气策略满意度、应急情况满意度及价格满意度组成,并将供气可靠度定义为仅考虑气量与压力满意度的用户满意度;再构建基于需求保障属性的天然气用户分级方法,将管网天然气用户分为需完全保障、可少量压减、可压减及可中断 4 类,采用层次分析法确定不同用户类型的用户满意度指标权重,并确立天然气管网供气可靠度与用户满意度的关联函数;基于天然气用户历史需求数据与供气数据,计算用户满意度的一级指标权重,并结合用户目标满意度,最终确定天然气管网目标可靠度。【结果】将新建的天然气管网目标可靠度确定方法应用于某实际天然气管网中,计算得到需完全保障用户、可少量压减用户及可压减用户的目标可靠度分别为 0.994 1、0.990 0 及 0.986 7;与基于风险与经济效益方法对比,新建方法将目标可靠度细化至每个用户,充分考虑用户保障属性,符合天然气管网工程实际及市场化需求,具有较好的可行性。【结论】基于用户满意度的天然气管网目标可靠度确定方法可以从需求侧计算系统管网供气可靠度的期望水平,确定当前系统供气可靠度距期望水平的差距,既能够为管网科学决策的制定提供依据,也能够为天然气管网系统可靠性理论的落地应用提供技术支撑。(图 4,表 7,参 28)

关键词: 天然气管网; 目标可靠度; 用户满意度; 供气可靠度

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)08-0941-11

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.08.011

A method to determine the target reliability of gas supply in natural gas pipeline networks based on user satisfaction

YU Weichao¹, SHAN Xiangying², WANG Kaihong¹, LI Yichen³, LAN Wen², MEN Yang², GONG Jing²

1. PipeChina Oil & Gas Control Center; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing);

3. PipeChina West-East Gas Pipeline Company

Abstract: [Objective] As a key component of the natural gas supply chain, natural gas pipeline networks link the production, trading, storage, and sales of natural gas. Establishing target reliability for these pipeline networks is a prerequisite for enhancing their operation regarding safety, stability, and efficiency. However, prior research on the reliability of natural gas pipeline networks has primarily focused on reliability indicators and the development of calculation methods related to gas supply reliability. Few studies have addressed the establishment of target reliability, often overlooking the gas demands and characteristics of users. [Methods] This paper presents a method for establishing the target reliability of natural gas pipeline networks based on user satisfaction. First, a user satisfaction indicator system is developed, which focuses on several factors: supply volume, supply pressure, gas quality, supply strategy, emergency response, and pricing. Consequently, gas supply reliability is defined as user satisfaction that considers only supply volume and pressure. Second, a user classification method based on supply guarantee attributes is introduced, categorizing natural gas users into four groups: full guarantee, tolerance to limited pressure reduction, tolerance to pressure reduction, and tolerance to disruption. The weights of user satisfaction

indicators for different user groups are calculated using an analytic hierarchy process (AHP), and a correlation function is established between gas supply reliability in pipeline networks and user satisfaction. Finally, utilizing historical data on user gas demand and supply, the weight of the first-level user satisfaction indicator is calculated and the target reliability for natural gas pipeline networks is determined taking into account the target user satisfaction. **[Results]** The proposed method for determining the target reliability of natural gas pipeline networks was applied to a real-world pipeline network, resulting in target reliability values of 0.9941, 0.9900, and 0.9867 for users in the first three groups, respectively. In contrast to risk-based and economic benefit-based methods, this new approach refines target reliability at the individual user level, fully accounting for user attributes concerning supply guarantee. This alignment with the actual conditions and market requirements of natural gas pipeline networks enhances the feasibility of this method. **[Conclusion]** The proposed method quantitatively evaluates the reliability of gas supply in natural gas pipeline networks, providing a basis for scientific decision-making regarding pipeline networks and offering technical support for the practical application of reliability theories in natural gas pipeline network systems. (4 Figures, 7 Tables, 28 References)

Key words: natural gas pipeline network, target reliability, user satisfaction, gas supply reliability

随着全球气候变暖加剧, 极端天气事件频发, 环境问题成为全球各国面临的重要挑战。作为最清洁的化石能源, 天然气的碳排放量仅为石油的 70%、煤炭的 50%, 被视为化石能源时代向新能源时代转型的桥梁^[1]。天然气管网作为天然气供应链的关键环节, 是天然气生产、贸易、储存及销售的重要纽带^[2], 其可靠运行直接关系到天然气的安全稳定供应。自 2013 年黄维和^[3]提出大型天然气管网系统可靠性概念以来, 国内外学者聚焦于天然气管网系统评价可靠性指标体系及方法开展了大量研究^[4-13], 形成了以机械可靠性及供气可靠性为评价指标的天然气管网系统可靠性评价指标体系^[4-5], 并构建了考虑管网运行状态不确定性与系统复杂性的供气可靠性计算框架^[6-7], 此外还提出了基于需求侧、资源侧等^[8-13]影响的天然气管网供气可靠性评价方法。然而, 由于系统可靠性缺乏参照值, 难以对系统可靠性增强策略的制定提供支撑, 使得天然气管网系统可靠性落地应用存在困难。

目前, 天然气管网系统目标可靠度分为单元目标可靠度与系统目标可靠度两部分^[13-14]。针对单元目标可靠度的研究主要是为了提升管道单元的使用寿命, 通常采用基于历史数据统计与基于风险分析的两种方法^[15-16]。如 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方法》等国外标准, 采用基于历史数据统计的方法, 通过分析管道历史失效数据确定不同安全等级下的管道单元目标可靠度, 并给出不同失效类型下的目标可靠度。与历史数据统计方法相比, 基于风险分析的方法充分考虑了管道尺寸、运

行工况等诸多因素, 确定管道单元在特定运行工况下的目标可靠度, 避免了历史数据统计方法因忽略管段差异导致的目标可靠度“过保守”或“欠安全”问题。由于管道运行过程中存在社会风险与个人风险, 学者们^[14, 17-19]通过构建风险可接受准则并计算风险后果, 来确定管道单元的目标可靠度。Nessim 等^[14]提出了一种考虑社会风险与个体风险的管道单元目标可靠度确定方法, 并基于管道压力、直径及人口密度等参数, 构建了相应的目标可靠度计算公式。Zhang 等^[18-19]提出了适用于陆上天然气管道单元的目标可靠度计算公式, 并成功应用于管道系统设计阶段。与单元目标可靠度相比, 天然气管网系统的目标可靠度研究相对较少。姚广玉等^[20]采用“自下向上”的方法, 先确定管道单元的目标可靠度, 基于已建立的管道系统可靠性评价方法, 计算得到管网系统的目标可靠度。Shan 等^[15]基于单元可接受风险, 提出了一种天然气管道系统目标供气可靠度的确定方法。该方法除社会风险、个人风险外, 还考虑了经济风险。此外, Shan 等^[16]采用投资效益准则, 通过权衡系统可靠性提升成本与可靠性增强收益, 构建了天然气管网系统目标可靠度的优化模型, 并采用遗传算法求解, 从而确定目标供气可靠度。

天然气管网可靠运行的目标是保障下游天然气各类用户的用气需求。然而, 上述研究未考虑天然气管网下游用户用气需求与用气特征。用户满意度是衡量天然气管网服务质量与用户需求满足程度的指标, 对天然气管网目标可靠度^[21-22]具有重大影响。为此, 构建基于用户满意度的天然气管网目标可靠度确定方法, 以期提升天然气管网运行安全与服务质量提供参考。

1 用户满意度指标体系

用户满意度是指天然气管网用户对于所接受管网系统供气服务的满意程度, 用于表征管网系统的供气服务能力。管网的供气服务通常包含气量、压力、气质、供气策略、应急情况供气、价格等诸多方面。

针对天然气管网系统的工艺特征及服务目标, 在

管网供气服务期间, 根据用户反馈及需求调研结果, 选取气量、压力、气质、供气策略、应急情况以及价格 6 个因素作为管网用户满意度的一级指标; 按照一级指标的内涵, 选取平均气量、平均压力、天然气组分、意外减量等 17 个可量化指标作为用户满意度评价的二级指标, 从而建立天然气管网用户满意度评价指标体系^[21-22](图 1)。

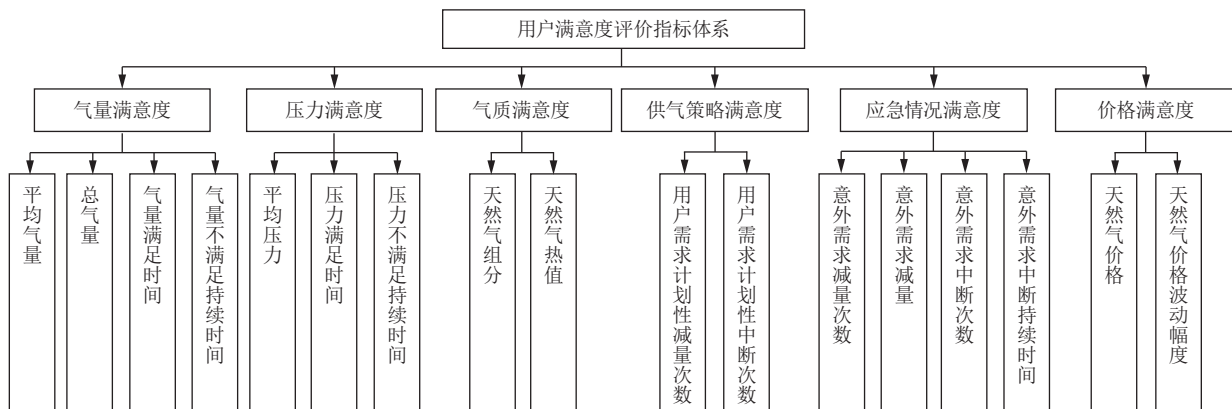


图 1 天然气管网用户满意度评价指标体系图

Fig. 1 User satisfaction indicator system for natural gas pipeline networks

此外, 天然气管网供气可靠度是指管网在规定时间内与条件下能够满足用户用气需求的能力^[23-24], 其中规定条件在具体的评价过程中通常被表示为用户所需压力。天然气管网供气可靠度可视为在假设管网压力满足用户需求条件下的气量满意度, 因此, 在用户满意度指标体系中也把供气可靠度定义为仅考虑气量满意度与压力满意度。

1.1 气量满意度

天然气管网的核心功能是为下游用户提供稳定可靠的天然气供应^[14], 而气量满意度^[25]是衡量用户对管网供气服务中气量供给满足程度的重要指标, 是用户满意度评价体系中的关键组成部分。

气量满意度分为气量供给充分性与供气服务时间连续性两个维度, 因此采用平均气量、总气量、气量满足时间及气量不满足持续时间 4 个二级指标进行量化分析: ①平均气量指标是指用户实际获得的平均供气量相较于用户期望值的满足程度, 反映了供气系统在稳定供给方面的能力。②总气量指标反映用户实际获得的累计供气量与期望值之间的匹配程度, 体现了管网整体供气能力的满足水平。③气量满足时间指标反映了用户需求气量被充分满足的时间比例, 是衡量供气服务连续性、供气稳定性的重要指标。④气量不满

足持续时间指标用以衡量用户气量需求未被满足的最长持续时间与用户期望值之间的偏差, 体现了管网在应对供气不足问题时的服务恢复能力及响应效率。由此, 气量满意度及其 4 个可量化二级指标的数学表达式分别为:

$$M_1 \in \{S_1, S_2, S_3, S_4\} \quad (1)$$

$$S_1 = \begin{cases} \frac{Q_0}{Q_{E0}}, & Q_0 \leq Q_{E0} \\ 1, & Q_0 > Q_{E0} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{Q_1}{Q_{E1}}, & Q_1 \leq Q_{E1} \\ 1, & Q_1 > Q_{E1} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_3 = \begin{cases} \frac{t_1}{t_{E1}}, & t_1 \leq t_{E1} \\ 1, & t_1 > t_{E1} \end{cases} \quad (4)$$

$$S_4 = \begin{cases} \frac{t_2}{t_{E2}}, & t_2 \geq t_{E2} \\ 1, & t_2 < t_{E2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: M_1 为气量满意度指标; S_1 为平均气量指标; S_2 为总气量指标; S_3 为气量满足时间指标; S_4 为气量不满足持续时间指标; Q_0 为管网实际供给用户天然气量的平均值, m^3 ; Q_{E0} 为用户平均需求气量期望值, m^3 ; Q_1 为管网实际供给用户天然气量的累加值, m^3 ; Q_{E1} 为用

户总供气量期望值, m^3 ; t_1 为用户需求气量满足的时间, d ; t_{E1} 为用户需求气量满足时间的期望值, d ; t_2 为用户需求气量不满足的最长持续时间, d ; t_{E2} 为用户最大需求气量不满足持续时间期望值, d 。

1.2 压力满意度

天然气在供气过程中不仅要保证足够的气量供给, 而且需要保证供给压力稳定且充足^[18]。因此, 将压力满意度作为衡量用户在气体压力维度上的满意程度。压力满意度主要从压力供给的充足性与压力服务时间的连续性两个维度进行量化评估, 主要包括平均压力、压力满足时间及压力不满足持续时间3个二级指标: ①平均压力指标是衡量用户实际获得的平均供气压力与期望压力间的匹配程度, 反映管网供气压力稳定性。②压力满足时间指标是衡量供气压力满足用户需求的时间与用户期望时间之比, 反映管网供气压力的持续性。③压力不满足持续时间指标是评估压力不满足需求的最大持续时间与用户期望值之间的差异, 用以衡量管网在压力不足时的服务恢复能力及响应水平。由此, 压力满意度及其3个可量化二级指标的数学表达式分别为:

$$M_2 \in \{S_5, S_6, S_7\} \quad (6)$$

$$S_5 = \begin{cases} \frac{p_0}{p_{E0}}, & p_0 \leq p_{E0} \\ 0, & p_0 > p_{E0} \end{cases} \quad (7)$$

$$S_6 = \begin{cases} \frac{t_3}{t_{E3}}, & t_3 \leq t_{E3} \\ 3, & t_3 > t_{E3} \end{cases} \quad (8)$$

$$S_7 = \begin{cases} \frac{t_4}{t_{E4}}, & t_4 \geq t_{E4} \\ 4, & t_4 < t_{E4} \end{cases} \quad (9)$$

式中: M_2 为压力满意度指标; S_5 为平均压力指标; S_6 为压力满足时间指标; S_7 为压力不满足持续时间指标; p_0 为管网实际供给用户气量压力的平均值, MPa; p_{E0} 为用户平均供气压力期望值, MPa; t_3 为用户供气压力满足需求的时间, d ; t_{E3} 为用户供气压力满足需求时间的期望值, d ; t_4 为用户供气压力不满足需求最大持续时间, d ; t_{E4} 为用户期望的最大压力不满足持续时间, d 。

1.3 气质满意度

天然气气质是天然气管网提供的服务之一, 因此将气质满意度用以衡量用户在气质方面的满意程度。天然气的组分与热值是天然气物性的关键指标, 针对商用天然气, 中国、部分欧洲、北美国家均颁布了相关

标准来要求其关键物性指标, 如 GB 17820—2018《天然气》、EN 16726-2016《天然气基础设施-气体质量》、DVGW G260-2013《气体质量》、AGA 4A-2009《天然气计量合约和质量条款》。

从天然气组分构成来衡量气质满意度, 主要考虑组分中的总硫质量浓度、硫化氢质量浓度及二氧化碳质量浓度, 其计算公式为:

$$S_8 = \begin{cases} 0, & c_1 > c_2 \cup c_3 > c_4 \cup x_1 > x_2 \\ 1, & c_1 \leq c_2 \cap c_3 \leq c_4 \cap x_1 \leq x_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_8 为天然气组分指标; c_1 为用户所接收天然气中硫的总质量浓度, mg/m^3 ; c_2 为 GB 17820—2018 规定的天然气中硫质量浓度, mg/m^3 ; c_3 为用户所接收天然气中硫化氢质量浓度, mg/m^3 ; c_4 为 GB 17820—2018 规定的天然气中硫化氢质量浓度, mg/m^3 ; x_1 为用户所接收天然气中的二氧化碳摩尔分数; x_2 为 GB 17820—2018 规定的天然气中二氧化碳摩尔分数。

天然气中硫的总含量、硫化氢含量以及二氧化碳摩尔分数的测量方式, 可参考 GB 17820—2018 的相关规定。通常利用天然气热值来衡量气质满意度, 其计算公式为:

$$S_9 = \begin{cases} 0, & q_1 < q_2 \\ 1, & q_1 \geq q_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_9 为天然气热值指标; q_1 为未开展全面热值计量时用户所接收的天然气热值, MJ/m^3 ; q_2 为 GB 17820—2018 规定的天然气热值, MJ/m^3 。

当中国全面开展热值计量后, 式(11)可表示为:

$$S_9 = \begin{cases} 0, & q_3 < q_E \\ 1, & q_3 > q_E \\ \frac{q_2}{q_E}, & q_3 \leq q_E \end{cases} \quad (12)$$

式中: q_3 为开展全面热值计量后用户所接收的天然气热值, MJ/m^3 ; q_E 为用户所接收天然气热值的期望值, MJ/m^3 。

综上, 气质满意度指标 M_3 的计算表达式为:

$$M_3 \in \{S_8, S_9\} \quad (13)$$

1.4 供气策略满意度

供气策略满意度用以衡量天然气管网是否能够根据用户需求制定合理的供气方案, 体现了供气计划的科学性、灵活性。供气计划通常包括小时分输计划、日分输计划、计划需求减少及计划需求中断等。使用用户需求计划性减量次数和用户需求计划性中断次数2个二

级指标计算应供气策略满意度。因此, 供气策略满意度指标及其 2 个可量化的二级指标的数学表达式分别为:

$$M_4 \in \{S_{10}, S_{11}\} \quad (14)$$

$$S_{10} = \begin{cases} \frac{N_{E1}}{N_1}, & N_{E1} \leq N_1 \\ 1, & N_{E1} > N_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$S_{11} = \begin{cases} \frac{N_{E2}}{N_2}, & N_{E2} \leq N_2 \\ 1, & N_{E2} > N_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中: M_4 为供气策略满意度指标; S_{10} 为用户需求计划性减量次数指标; S_{11} 为用户需求计划性中断次数指标; N_1 为按用户需求计划性减量次数; N_{E1} 为用户计划性减量次数期望值; N_2 为按用户需求计划性中断次数; N_{E2} 为用户计划性中断次数期望值。

1.5 应急情况满意度

应急情况满意度是指用户在非计划性需求减量、非计划性需求中断等应急情况下对供气服务的满意程度^[23]。为全面评估应急情况下的用户满意度, 从意外需求中断次数、意外需求中断持续时间、意外需求减量次数、意外需求减量 4 个维度进行分析。

当发生需求中断紧急情况时, 使用意外需求中断次数与意外需求中断持续时间 2 个二级指标计算应急情况满意度。由此, 这两个二级指标的数学表达式分别为:

$$S_{12} = \begin{cases} \frac{N_{E3}}{N_3}, & N_{E3} \leq N_3 \\ 1, & N_{E3} > N_3 \end{cases} \quad (17)$$

$$S_{13} = \begin{cases} \frac{t_{E5}}{t_5}, & t_{E5} \leq t_5 \\ 1, & t_{E5} > t_5 \end{cases} \quad (18)$$

式中: S_{12} 为意外需求中断次数指标; S_{13} 为意外需求中断持续时间指标; N_3 为用户用气所受到的意外需求中断次数; N_{E3} 为用户用气所受到的意外需求中断次数期望值; t_5 为用户用气未受到意外需求中断的持续时间, d ; t_{E5} 为用户用气未受到意外需求中断的持续时间的期望值, d 。

当发生需求削减应急事件时, 采用意外需求减量次数进行评价, 该二级指标的数学表达式分别为:

$$S_{14} = \begin{cases} \frac{N_{E4}}{N_4}, & N_{E4} \leq N_4 \\ 1, & N_{E4} > N_4 \end{cases} \quad (19)$$

式中: S_{14} 为意外需求减量次数指标; N_4 为用户用气所

受到的意外减量次数; N_{E4} 为用户用气所受到的意外减量次数期望值。

当采用意外需求减量作为二级指标时, 其数学表达式分别为:

$$S_{15} = \begin{cases} \frac{Q_{E2}}{Q_2}, & Q_{E2} \leq Q_2 \\ 1, & Q_{E2} > Q_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中: S_{15} 为意外需求减量指标; Q_2 为用户所受到的意外需求减量, m^3 ; Q_{E2} 为用户所受到的意外需求减量期望值, m^3 。

综上, 可以计算出应急情况满意度指标 M_5 , 其表达式为:

$$M_5 \in \{S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{15}\} \quad (21)$$

1.6 价格满意度

在其他能源行业中, 能源价格通常是衡量商品或服务满意度的重要指标。在天然气行业高度市场化的部分欧美国家, 天然气价格对用户满意度具有直接且显著的影响。然而, 中国的天然气市场化程度相对较低, 天然气价格受到严格监管, 难以由天然气管网运营方自主调整。随着中国未来天然气市场逐步成熟、市场化程度不断提高, 今后用户对天然气价格的满意度 M_6 将成为评价体系中的重要考量因素。

2 天然气管网目标可靠度确定方法

天然气管网系统目标可靠度指的是在规定时间内、规定条件下完成规定输气任务的能力的期望值。基于用户满意度的天然气管网目标可靠度确定方法的步骤为: 首先建立天然气管网用户满意度指标体系, 进一步提出基于需求保障属性的天然气用户分级方法, 从而将管网天然气用户分为需完全保障、可少量压减、可压减及可中断用户 4 类; 然后, 采用层次分析法, 确定不同类型用户的满意度评价指标权重; 最后, 基于各类用户指标的权重, 建立管网目标可靠度与用户满意度的关联函数, 并结合天然气管网用户历史需求数据与供气数据, 计算用户满意度指标, 从而确定天然气管网目标可靠度。

2.1 基于需求保障属性的天然气用户分级

目前, 在传统的天然气用户分级中, 通常依据用户的用气用途进行分级(图 2a)。然而, 在供需不平衡的情况下, 该分级无法为资源的合理调配或运行计划的动态调整提供有效支持, 难以满足天然气管网运营

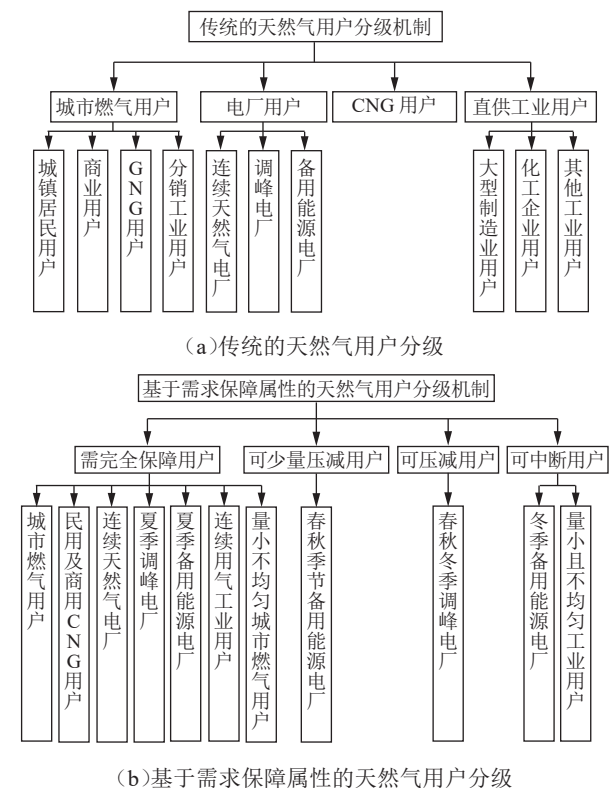


图 2 两种天然气用户分级体系对比图

Fig. 2 Comparison of two classification methods for natural gas users

商在需求侧管理中的实际需求。在实际情况下,城市燃气用户中的居民用气与非居民用气占比不同,若非居民用户占比过高,则城市燃气用户中的分销工业用户相较于直供工业用户的分级有失公允。具有不同功能的电厂在分级中也应该有所区别,冬季保供时,调峰电厂及具有备用能源的电厂应发挥缓解管网保供压力的作用。直供工业用户在合同签订时应明确其供气的可中断性,在供需紧张时为保供做出贡献。因此,综合考虑用户用气类别与实际用气特性,依据用户的需求保障属性进行分级,并参考文献[21],将用户分为需完全保障用户、可少量压减用户、可压减用户、可中断用户(图 2b)。可见,两种分级机制在分级依据、用户类别、适用场景等方面存在较大不同(表 1)。

表 1 两种天然气用户分级机制对比表

Table 1 Comparison of two classification mechanisms for natural gas users

| 分级机制 | 分级依据 | 适用场景 | 分类特点 |
|---------------|------------------|-----------------------|-------------------|
| 传统分级机制 | 用户用气的用途 | 适用于基本分类管理 | 缺乏明确的资源调配规则 |
| 基于需求保障属性的分级机制 | 用户的需求保障属性及实际用气特性 | 支持需求侧管理、动态资源调配及运行方案调整 | 明确不同用户的供气优先级及可中断性 |

2.2 用户满意度指标权重的确定

在上述天然气用户满意度指标体系中,每一类指标均相互独立,指标之间的影响可忽略不计。因此,选择层次结构相对简单的层次分析法确定用户满意度各指标权重,其步骤包括建立递阶层次结构模型、构造判断矩阵、矩阵的一致性校验及指标的权重确定。

根据层次分析法构建递阶层次结构模型,该模型包括目标层、准则层及指标层 3 层。以用户满意度作为目标层,将其分解为气质满意度、供气策略满意度、供气可靠度、应急情况满意度及价格满意度 5 个准则层要素。进一步地,在指标层中,将气质满意度细化为天然气组分、天然气热值 2 个指标;将供气策略满意度细化为小时/天分输计划、计划性压减/中断情况 2 个指标;将应急情况满意度细化为意外减量、意外减量次数、意外中断次数及意外中断持续时间 4 个指标,其余准则层要素可单独作为指标进行建模。

采用层次分析法对完全保障用户、可少量压减用户、可压减用户、可中断用户的满意度评价体系进行量化,构建 4 类用户的满意度判断矩阵(表 2)。经计算,得出该 4 种用户的矩阵通过一致性检验,并得到最大特征值 λ_{\max} 、一致性指标 CI(Consistency Index)、随机一致性指标 RI(Random Index)及一致性比率 CR(Consistency Ratio)。其中,各类用户的 CR 均小于 0.1,表明其判断矩阵具有良好的一致性(表 3)。因此,得到 4 种用户供气可靠度、气质满意度、供气策略满意度、应急情况满意度、价格满意度 5 个一级指标的权重(表 4)。

2.3 管网目标可靠度与用户满意度的关联函数

根据上述计算得到的五个一级指标的权重结果(表 4),不同类型用户的满意度 M_0 可通过式(22)进行计算:

$$M_0 = w_1 R + w_2 M_3 + w_3 M_4 + w_4 M_5 + w_5 M_6 \quad (22)$$

式中: w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 分别为供气可靠度、气质满意度、供气策略满意度、应急情况满意度及价格满意度的权重; R 为供气可靠度。

根据式(22),可得到天然气管网目标可靠度 R_T 的计算公式:

$$R_T = \frac{M_T - (w_2 M'_3 + w_3 M'_4 + w_4 M'_5 + w_5 M'_6)}{w_1} \quad (23)$$

式中: M_T 为用户目标满意度; M'_3 为用户目标气质满意度; M'_4 为用户目标供气策略满意度; M'_5 为用户目标应急情况满意度; M'_6 为用户目标价格满意度。

表 2 4 种不同类型用户的满意度判断矩阵表
Table 2 Satisfaction judgment matrix for users across four groups

| 用户类型 | 用户满意度一级指标 | 指标对比重要性 | | | | |
|---------|-----------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | | 供气可靠度 | 气质满意度 | 供气策略满意度 | 应急情况满意度 | 价格满意度 |
| 需完全保障用户 | 供气可靠度 | 1 | 5 | 7 | 3 | 9 |
| | 气质满意度 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1 |
| | 供气策略满意度 | 1/7 | 3 | 1 | 1/3 | 4 |
| | 应急情况满意度 | 1/3 | 5 | 3 | 1 | 8 |
| | 价格满意度 | 1/9 | 1 | 1/4 | 1/8 | 1 |
| 可少量压减用户 | 供气可靠度 | 1 | 5 | 6 | 4 | 9 |
| | 气质满意度 | 1/5 | 1 | 1/2 | 1/4 | 1 |
| | 供气策略满意度 | 1/6 | 2 | 1 | 1/2 | 2 |
| | 应急情况满意度 | 1/4 | 4 | 2 | 1 | 7 |
| | 价格满意度 | 1/9 | 1 | 1/2 | 1/7 | 1 |
| 可压减用户 | 供气可靠度 | 1 | 5 | 6 | 6 | 9 |
| | 气质满意度 | 1/5 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1 |
| | 供气策略满意度 | 1/6 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| | 应急情况满意度 | 1/6 | 3 | 1 | 1 | 6 |
| | 价格满意度 | 1/9 | 1 | 1/2 | 1/6 | 1 |
| 可中断用户 | 供气可靠度 | 1 | 5 | 7 | 9 | 6 |
| | 气质满意度 | 1/5 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| | 供气策略满意度 | 1/7 | 1/2 | 1 | 1 | 1 |
| | 应急情况满意度 | 1/9 | 1/3 | 1 | 1 | 1/2 |
| | 价格满意度 | 1/6 | 1 | 1 | 2 | 1 |

表 3 4 种不同类型用户的满意度判断矩阵一致性检验结果表
Table 3 Consistency check results of satisfaction judgment matrix for users in four groups

| 用户类型 | 最大特征值 | CI 值 | RI 值 | CR 值 | 一致性检验结果 |
|---------|-------|-------|------|-------|---------|
| 需完全保障用户 | 5.275 | 0.069 | 1.12 | 0.061 | 通过 |
| 可少量压减用户 | 5.185 | 0.046 | 1.12 | 0.041 | 通过 |
| 可压减用户 | 5.270 | 0.068 | 1.12 | 0.060 | 通过 |
| 可中断用户 | 5.076 | 0.019 | 1.12 | 0.017 | 通过 |

表 4 基于层次分析法计算得到的 4 种不同类型用户满意度权重结果表
Table 4 Calculated weights of satisfaction for users across four groups based on AHP

| 用户类型 | 指标权重 | | | | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 供气可靠度 | 气质满意度 | 供气策略满意度 | 应急情况满意度 | 价格满意度 |
| 需完全保障用户 | 0.513 50 | 0.055 01 | 0.116 64 | 0.272 82 | 0.042 03 |
| 可少量压减用户 | 0.546 40 | 0.064 63 | 0.108 49 | 0.229 11 | 0.051 37 |
| 可压减用户 | 0.588 45 | 0.067 89 | 0.123 73 | 0.167 30 | 0.052 63 |
| 可中断用户 | 0.610 89 | 0.140 12 | 0.079 70 | 0.060 84 | 0.108 45 |

3 算例应用

3.1 管网概况

某天然气管网(图 3)由 4 条干线管道组成, 包括

11 个气源、19 个压缩机组、146 个管段及 50 个天然气用户。4 条干线管道的输送能力存在明显差异(表 5), 其气源以气田、管道气为主: 气田类气源 S_1 、 S_2 、 S_3 及 S_{10} 的最大供气能力分别为 $140\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1\,468\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、

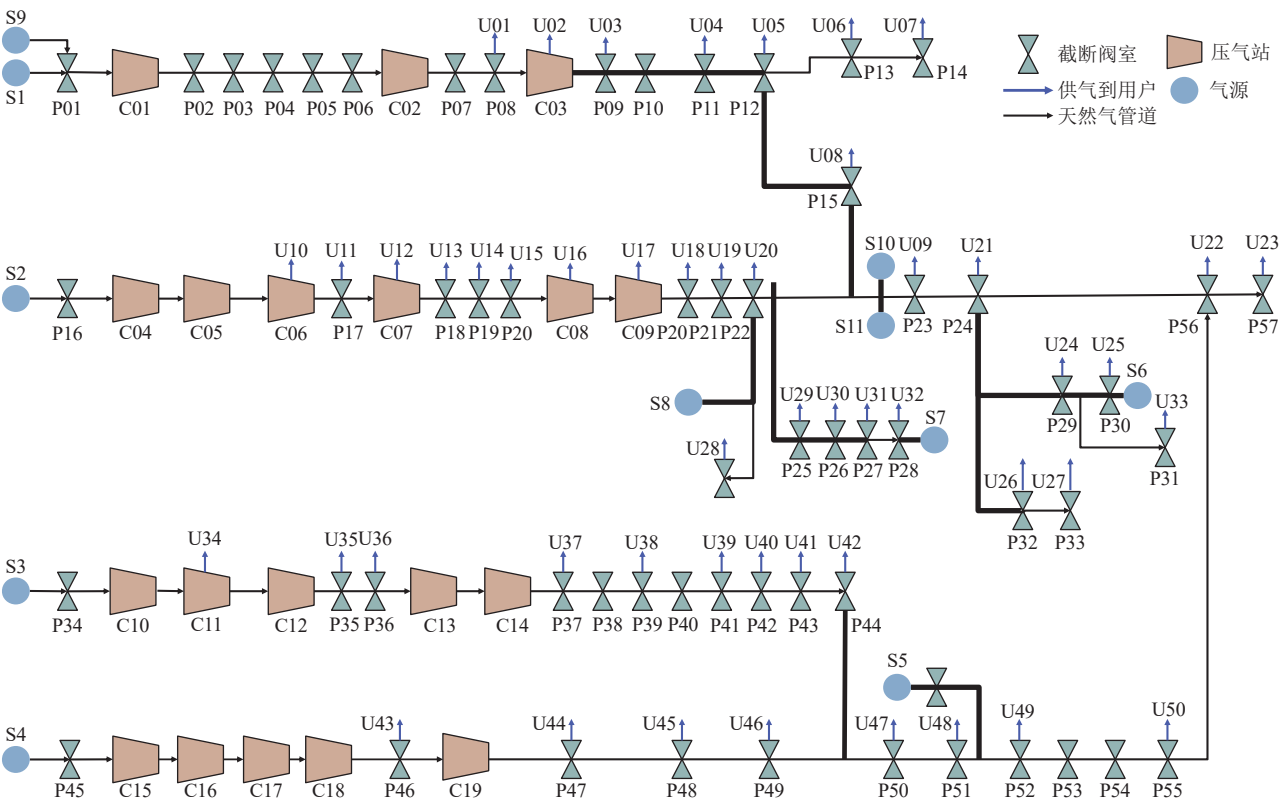


图 3 某天然气管网系统组成示意图
Fig. 3 Composition of a natural gas pipeline network system

表 5 某天然气管网干线管道参数统计表
Table 5 Statistics of parameters of trunk pipelines in a natural gas pipeline network

| 干线管道 编号 | 里程/ km | 管径/ mm | 壁厚/ mm | 设计压力/ MPa | 设计输量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹) |
|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---|
| 1 | 855 | 660 | 7 | 7 | 904 |
| 2 | 782 | 1 016 | 14 | 10 | 4 657 |
| 3 | 972 | 1 016 | 17 | 10 | 4 286 |
| 4 | 1 063 | 1 219 | 22 | 12 | 7 143 |

1 387×10⁴ m³/d、18×10⁴ m³/d; 管道气类气源 S₄~S₉及 S₁₁ 的最大供气能力则分别达到了 1 760×10⁴ m³/d、117×10⁴ m³/d、454×10⁴ m³/d、95×10⁴ m³/d、465×10⁴ m³/d、347×10⁴ m³/d 及 1 532×10⁴ m³/d。基于图 2b, 该管网用户可分为需完全保障用户、可少量压减用户、可压减用户 3 类。

3.2 用户满意度的计算

在确定天然气管网目标可靠度之前, 先采用层次分析法确定不同用户类型的用户满意度权重。由于缺乏算例应用管道足够的历史数据, 算例管网用户满意度仅考虑供气可靠度的满意度、供气策略的满意度。采用层次分析法, 根据 3 类用户的满意度判断矩阵(表 6), 计算得到该管道 3 类用户的供气可靠度与供气策略满意度权重(表 7)。

表 6 3 种不同类型用户的满意度判断矩阵表
Table 6 Satisfaction judgment matrix for users across three groups

| 用户类型 | 用户满意度 一级指标 | 指标对比重要性 | |
|---------|---------------|---------|---------|
| | | 供气可靠度 | 供气策略满意度 |
| 需完全保障用户 | 供气可靠度 | 1 | 1 |
| | 供气策略满意度 | 1 | 1 |
| 可少量压减用户 | 供气可靠度 | 1 | 2 |
| | 供气策略满意度 | 1/2 | 1 |
| 可压减用户 | 供气可靠度 | 1 | 3 |
| | 供气策略满意度 | 1/3 | 1 |

表 7 某天然气管网用户满意度评价指标权重表
Table 7 Weights of user satisfaction evaluation indicators for a natural gas pipeline network

| 用户类型 | 指标权重 | |
|---------|----------|----------|
| | 供气可靠度 | 供气策略满意度 |
| 需完全保障用户 | 0.500 00 | 0.500 00 |
| 可少量压减用户 | 0.666 67 | 0.333 33 |
| 可压减用户 | 0.750 00 | 0.250 00 |

3.3 天然气管网目标可靠度确定

根据式(23), 该管道天然气管网目标可靠度的计算式为:

$$R_T = \frac{M_0 - w_3 M'_4}{w_1} \tag{24}$$

对该管道天然气管网用户需求计划性减量次数、用户需求计划性中断次数进行统计, 结合压减-中断期望值判定原则, 计算历史供气策略满意度, 并将其假定为用户目标供气策略满意度。由于缺乏天然气管网用户目标满意度确定的相关标准以及规定, 参考 G/QDW 10738—2020《配电网规划设计技术导则》中

针对电网系统供电质量的规划目标, 确定天然气管网系统需完全保障用户、可少量压减用户、可压减用户、可中断用户目标满意度分别需达到 99.70%、96.00%、95.00%、90.00%。根据式(24)及 4 种用户目标满意度, 可计算得到该天然气管网不同用户的目标供气可靠度数据(图 4)。

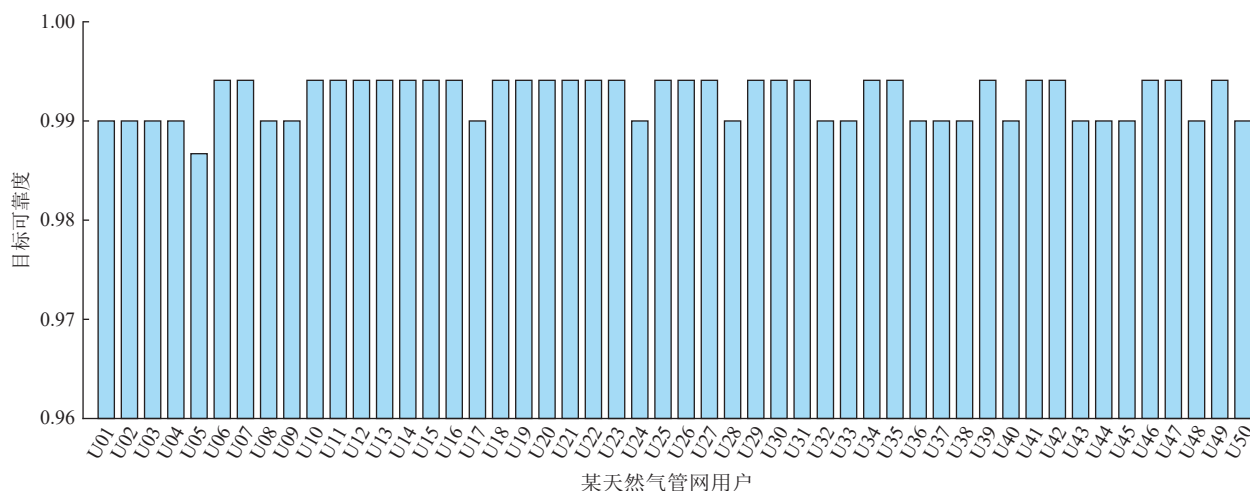


图 4 某天然气管网目标可靠度计算结果图

Fig. 4 Calculation results of target reliability for a natural gas pipeline network

可见, 该管道需完全保障用户、可少量压减用户、可压减用户的目标可靠度分别为 0.994 1、0.990 0、0.986 7。根据目标可靠度计算结果确定用户的日平均最大允许压减气量, 以用户 $1\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的需求量为例, 需完全保障用户、可少量压减用户、可压减用户的日平均最大允许压减气量分别为 $5.9\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $13.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 指导实际生产运行。此外, 在制定天然气管网运行方案过程中, 根据计算的天然气管网目标可靠度(图 4), 可支持筛选达到目标可靠度的运行方案, 其中运行方案的供气可靠度评价参考文献 [11]、[26]。可以看出, 用户用气保障程度越高, 其管网供气可靠度目标值越大, 允许压减的气量越小, 符合工程实际情况。随着天然气管网系统市场化的纵深推进, 天然气管网的调控运行将更加侧重用户的体验与满意度^[27-28], 所提出的方法能够支持天然气管网的基于可靠性的管理与用户需求侧管理。

4 结论

1)提出了一种基于用户满意度的天然气管网目标可靠度确定方法, 从天然气管网用户满意度出发, 构建了考虑管网的供气量、压力、气质、供气策略、应急

处理等多个维度的用户满意度指标体系。通过确定不同用户类型的满意度指标权重, 建立了管网供气可靠度与用户满意度的关联函数, 结合用户历史需求数据与供气数据, 计算用户满意度各评价指标的期望值, 从而确定天然气管网系统目标可靠度。

2)与传统的单元目标可靠度确定方法相比, 新提出的方法能够从系统层面衡量天然气管网当前供气可靠度是否达到期望值, 再根据目标可靠度确定用户的日平均最大允许压减气量, 科学指导天然气管网系统的生产运行。同时, 该方法充分考虑天然气管网下游用户用气需求与用气特征, 从需完全保障、可少量压减、可压减及可中断 4 类用户确定天然气管网目标可靠度, 能够支持天然气管网的用户需求侧管理。

3)未来的研究还需在天然气管网拓展供气服务的同时, 将供气服务指标纳入评价体系中, 并根据管网的发展情况不断完善用户满意度评价体系。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄维和. 推动管道工程技术创新, 构建新型管道运输系统[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 4–7.
- HUANG W H. Promoting pipeline engineering technology innovation and constructing new pipeline transportation system[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 4–7.
- [3] 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](https://doi.org/10.7623/syxb201302026).
- HUANG W H. Reliability of large-scale natural gas pipeline network[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 401–404.
- [4] 廖柯熹, 王敏安, 杨建英, 彭浩, 何国玺, 冷吉辉, 等. 天然气管网系统性能评价指标及方法研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5630–5640. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2021.14.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2021.14.003).
- LIAO K X, WANG M A, YANG J Y, PENG H, HE G X, LENG J H, et al. Research progress on performance evaluation index and method of natural gas pipeline network system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14): 5630–5640.
- [5] 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](https://doi.org/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.
- [6] 苏怀. 天然气管网供气可靠性评价方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- SU H. Research on assessment method of supply reliability of natural gas pipeline networks[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [7] SU H, ZHANG J J, ZIO E, YANG N, LI X Y, ZHANG Z J. An integrated systemic method for supply reliability assessment of natural gas pipeline networks[J]. *Applied Energy*, 2018, 209: 489–501. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.10.108](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.108).
- [8] 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.
- [9] 陈潜. 基于供需双侧随机性的输气管网供气可靠性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- CHEN Q. Research on delivery reliability of gas pipeline networks for stochastic source supplies and demands[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [10] 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](https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107651).
- [11] YANG K, HOU L, MAN J F, YU Q Y, LI Y, ZHANG X R, et al. Supply reliability analysis of natural gas pipeline network based on demand-side economic loss risk[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 230: 108961. DOI: [10.1016/j.ress.2022.108961](https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108961).
- [12] 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](https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109431).
- [13] HASSANIEN S, LEBLANC L, NEMETH A. Towards an acceptable pipeline integrity target reliability[C]. Calgary: 2016 11th International Pipeline Conference, 2016: V002T07A015.
- [14] 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](https://doi.org/10.1115/1.3110017).
- [15] SHAN X Y, YU W C, GONG J, WEN K, WANG H, REN S P, et al. A methodology to determine the target reliability of natural gas pipeline systems based on risk acceptance criteria of pipelines[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(2): 100150. DOI: [10.1016/j.jpse.2023.100150](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100150).
- [16] SHAN X Y, YU W C, HU B, WEN K, REN S P, MEN Y, et al. A methodology to determine target gas supply reliability of natural gas pipeline system based on cost-benefit analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 251: 110364. DOI: [10.1016/j.ress.2024.110364](https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110364).
- [17] 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.
- [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] 姚广玉, 郑洪龙, 李大全, 魏然然, 孙巧飞, 杨凯. 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. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.006](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.006).
- YAO G Y, ZHENG H L, LI D Q, WEI R R, SUN Q F, YANG K. Calculation method for target reliability of natural gas pipeline systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 896–904.
- [21] 李熠辰. 天然气干线管网用户满意度表征及气量分配算法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- LI Y C. Study on user satisfaction of natural gas pipeline networks and gas distribution algorithm[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [22] HUANG W H, LI Y C, YU W C, YU H T, SHAN X Y, WANG H, et al. An evaluation index system of the user satisfaction for the natural gas pipeline network[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2021, 1(4): 452–458. DOI: [10.1016/j.jpse.2021.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.11.001).
- [23] 李明菲, 周利剑, 郑洪龙, 杨辉, 雷铮强, 薛鲁宁, 等. 我国天然气管网系统可靠性评价技术现状[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 464–468. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2015.05.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2015.05.002).
- LI M F, ZHOU L J, ZHENG H L, YANG H, LEI Z Q, XU L N, et al. Current reliability assessment techniques for natural gas pipeline networks in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 464–468.
- [24] 黄燕菲, 吴长春, 陈潜, 王莉, 左丽丽, 赵亚南, 等. 基于不确定性用气量的输气管网供气可靠度计算方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 126–133.
- HUANG Y F, WU C C, CHEN Q, WANG L, ZUO L L, ZHAO Y N, et al. A computation model for gas supply reliability analysis in a gas pipeline network based upon the uncertainty of gas consumption[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 126–133.
- [25] 陈传胜, 周军. 基于用户满意度的天然气购销决策优化[J]. 油气储运, 2022, 41(10): 1225–1234. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.014](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.014).
- CHEN C S, ZHOU J. Optimization of natural gas purchase and sales decision based on customer satisfaction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(10): 1225–1234.
- [26] 杨凯. 天然气管网供气目标可靠度确定及应用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- YANG K. Research on gas supply target reliability index determination and application of natural gas pipeline network[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [27] 范霖, 玉德俊, 杨超, 宁喜凤, 苏怀, 张劲军. 天然气管网供气可靠性评价及优化研究进展[J]. 油气与新能源, 2024, 36(4): 108–116. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2024.04.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2024.04.012).
- FAN L, WANG D J, YANG C, NING X F, SU H, ZHANG J J. Review on assessment and optimization of the supply reliability of natural gas networks[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(4): 108–116.
- [28] 温文, 艾慕阳, 李煜津, 徐磊, 刘文会, 牛亚琨. 基于管网可靠度的天然气市场满意度评价[J]. 油气储运, 2019, 38(04): 385–391. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.04.005](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.04.005).
- WEN W, AI M Y, LI Y J, XU L, LIU W H, NIU Y K. Evaluation on satisfaction of natural gas market based on pipeline network reliability[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(04): 385–391.
- (编辑: 李在蓉)
-
- 基金项目:** 国家管网集团油气调控中心科学研究与技术开发项目“天然气管网供气可靠性计算方法研发及试点应用(一期)”, TQDK-SSCC202401.
- 作者简介:** 虞维超, 男, 1992年生, 高级工程师, 2019年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事天然气管网仿真优化、供气可靠性、智能调控方向的研究工作。地址: 北京市朝阳区东土城路5号, 100013。电话: 13261304066。Email: cupwhut@163.com
- 通信作者:** 宫敬, 女, 1962年生, 教授, 享受国务院政府特殊津贴, 1995年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气储运系统仿真与运行控制、油气输送流动安全保障等技术方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 13501036944。Email: ydgj@cup.edu.cn
- Received: 2025-01-17
 - Revised: 2025-02-21
 - Online: 2025-04-07

