

# 天然气管网系统可靠性评价指标研究

虞维超<sup>1</sup>, 黄维和<sup>2</sup>, 宫敬<sup>1\*</sup>, 温凯<sup>1</sup>, 李熠辰<sup>1</sup>, 党富华<sup>3</sup>, 熊骥禹<sup>4</sup>

1 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室, 北京 102249

2 中国石油天然气股份有限公司, 北京 100007

3 北京东方华智石油工程有限公司, 天津 301700

4 成都中石油昆仑能源有限公司, 成都 610000

\* 通信作者, ydgj@cup.edu.cn

收稿日期: 2019-01-27

国家自然科学基金(51874323, 51504271)、国家十三五科技重大专项(2016ZX05066005-001)和国家十三五科技重大课题(2016ZX05037005)联合资助

**摘要** 天然气管网系统是指由多条干线天然气长输管道及其配套储气调峰设施组成的、各子系统之间具有信息和天然气互联互通能力的大型基础设施。天然气管网系统作为连接天然气资源和市场的纽带, 其可靠运行直接关系到天然气的安全平稳供应。因此, 有必要对天然气管网系统可靠性进行研究, 保障我国公共安全和能源安全。其中, 提出一套客观、明确的指标体系用以量化天然气管网系统的可靠性是管网系统可靠性研究的关键。本文归纳和总结了天然气管网系统可靠性研究成果, 基于天然气管网的特征和功能, 并结合管网可靠性研究的应用需求, 将管网系统可靠性分为机械可靠性、水力可靠性和供气可靠性。基于此, 提出三类可靠性评价指标, 包括管网系统机械可靠性评价指标、水力可靠性评价指标和供气可靠性评价指标, 分别用于表征系统正常运行能力、完成供气任务能力和满足市场需求能力。

**关键词** 天然气管网系统; 可靠性指标; 机械可靠性; 水力可靠性; 供气可靠性

## Research into a reliability evaluation index of natural gas pipeline network systems

YU Weichao<sup>1</sup>, HUANG Weihe<sup>2</sup>, GONG Jing<sup>1</sup>, WEN Kai<sup>1</sup>, LI Yichen<sup>1</sup>, DANG Fuhua<sup>3</sup>, XIONG Jiyu<sup>4</sup>

1 Technology National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China

3 Oriental Huazhi Petroleum Engineering Co.Ltd., Tianjin 301700, China

4 PetroChina Kunlun Energy Co. Ltd., Chengdu 610000, China

**Abstract** A natural gas pipeline network system is an example of large-scale infrastructure. It is composed of a number of long-distance natural gas transmission pipelines and their supporting facilities such as underground gas storages, with information and natural gas interconnection capabilities. As critical infrastructure connecting gas resources and markets, the security of gas supply is directly related to the safe and reliable operation of the natural gas pipeline network system. Therefore, it is necessary to study the reliability of natural gas pipeline systems to ensure public safety and energy security in China. An

引用格式: 虞维超, 黄维和, 宫敬, 温凯, 李熠辰, 党富华, 熊骥禹. 天然气管网系统可靠性评价指标研究. 石油科学通报, 2019, 02: 184-191

YU Weichao, HUANG Weihe, GONG Jing, WEN Kai, LI Yichen, DANG Fuhua, XIONG Jiyu. Research into a reliability evaluation index of natural gas pipeline network systems. Petroleum Science Bulletin, 2019, 02: 184-191. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.017

objective reliability index system is the key to quantifying the reliability of the natural gas pipeline network system. In this paper, by reviewing previous research into natural gas pipeline network reliability and combining the practical application requirements of the pipeline network reliability research, the reliability of natural gas pipeline network systems is divided into mechanical reliability, hydraulic reliability, and gas supply reliability based on the characteristics and functions of the natural gas pipeline network. Moreover, three types of reliability evaluation indicators are proposed, and are used to quantify the capacity of normal operation, the capacity of completing the required gas supply tasks, and the capacity of satisfying required demand.

**Keywords** natural gas pipeline network system; reliability evaluation index; mechanical reliability; hydraulic reliability; gas supply reliability

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.017

## 0 前言

随着我国低碳经济的快速发展,天然气作为清洁高效的化石能源,其需求呈现高速增长的趋势。国家统计局数据显示,2000年我国天然气消费量为245.03亿 $\text{m}^3$ ,到2017年已经增长到2373亿 $\text{m}^3$ ,预计2020年天然气需求量将突破3000亿 $\text{m}^3$ 。与此同时,天然气在我国一次能源消费结构比重也是逐年增加,从2005年的仅占2.4%增长到2017年7.3%,2020年将力争达到10%左右,具体数据如图1所示。

天然气管网系统是指由多条干线天然气长输管道及其配套储气调峰设施组成、各子系统之间具有信息和天然气互联互通能力的大型基础设施。天然气管网是连接天然气资源和市场的纽带,其可靠运行直接关系到天然气用户的用气安全。因此,保障用户的用气

需求,提高天然气管网系统可靠性具有理论和工程意义。黄维和院士<sup>[1]</sup>于2013年提出了大型天然气管网系统可靠性概念,文章认为提出一套客观、明确的指标体系用以量化管网系统的可靠性仍是当前大型管网系统可靠性研究所面临的挑战。

根据可靠性的定义,产品的可靠性是指:产品在规定的条件下、在规定的时间内完成规定的功能的能力。基于对产品规定功能的理解不同,可靠性可以对产品不同方面的功能进行表征和衡量。为了对天然气管网系统的功能进行更全面的描述,本研究归纳和总结了已有的天然气管网系统可靠性研究成果,并结合管网系统的特征以及实际应用需求,将管网系统可靠性分为三个方面,包括机械可靠性、水力可靠性和供气可靠性,并基于此提出相应的可靠性指标。管网系统机械可靠性,其研究对象是管网系统中的单元,子

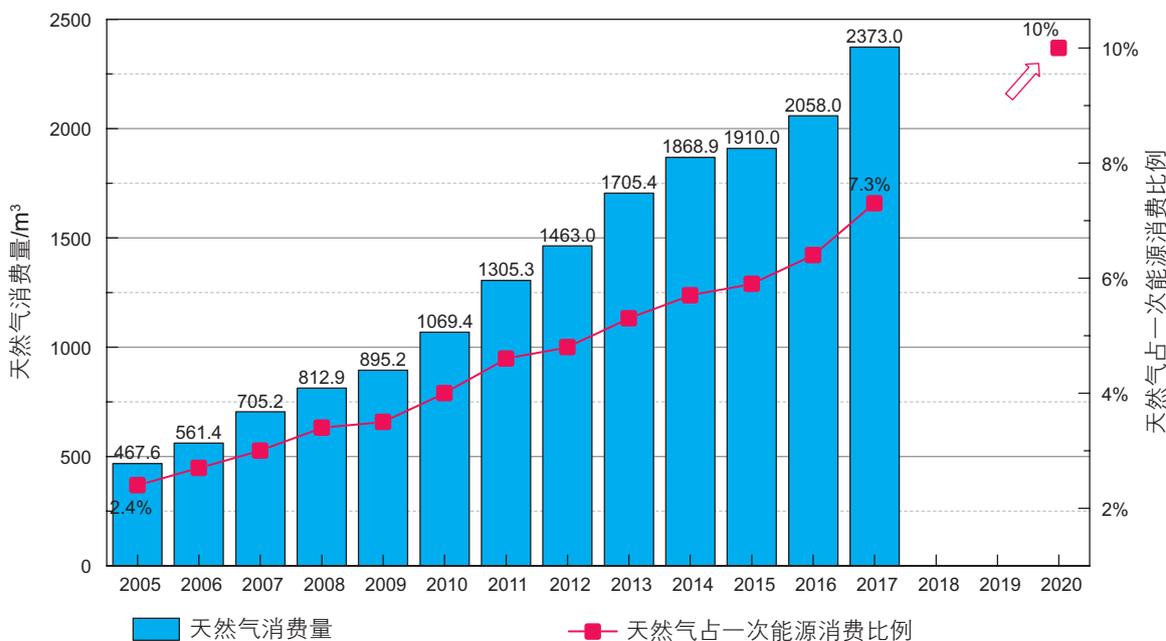


图1 我国天然气消费量及其占一次能源比例

Fig. 1 Natural gas consumption in China and its share of gross primary energy consumption.

系统或整个系统,目的是对单元或系统保持正常运行的能力进行表征。水力可靠性,其研究对象是天然气管道输送系统,可以是单条天然气干线长输管道或是由多条彼此之间具有互联互通能力的干线管道组成的天然气管网系统,目的是对管输系统完成规定的供气任务进行评价,即对系统的供气能力进行评价。供气可靠性,其研究对象是由上游气源、中游管输系统组成的天然气供应系统,用于评价供应系统满足下游市场需求的能力。供气可靠性研究中还需考虑市场需求的影响。目前供气可靠性研究中,对于上游气源或资源的影响较难考虑,因其非单纯技术问题,涉及到政治、经济、社会等各方面因素。在对供气可靠性研究时常将上游资源影响简化,假设其能稳定供应,只对中游管输系统进行研究,即对天然气管道系统或天然气管网系统满足市场需求的能力进行评价。这三类可靠性的关系如图2所示。

由图2可知,系统的机械可靠性和管网系统的水热力特征共同决定了系统的水力可靠性;系统的水力可靠性与上游资源、配套储气调峰设施以及下游需求共同决定了系统的供气可靠性。

## 1 管网系统机械可靠性指标

已有研究中用于表征机械可靠性的指标,主要包括体现单元和系统失效以及维修速度的失效率 $\lambda$ 和维修率 $\mu$ ;体现单元或系统保持正常运行能力的可靠度 $R$ 和处于正常工作状态能力的可用度 $A$ ;综合单元或系统的失效概率和失效后果的风险 $Risk$ 。

文献<sup>[2-3]</sup>采用失效率作为管道线路部分的可靠性指标,其中干线管道失效率定义为每年每千公里管线上发生事故的平均次数,如下式:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} n_i}{\sum_{i=1}^{\tau} L_i} \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 为管线上发生事故的平均次数,即失效率,次/km·a; $\tau$ 为管道运行时间,a; $n_i$ 为第*i*年所统计的输气管道事故数; $L_i$ 为第*i*年所统计的输气管道的长度,km。

文献<sup>[4-6]</sup>基于历史失效数据库,采用下式对天然气管道失效率进行计算:

$$\varphi = \sum_k \varphi_k K_k(a_1, a_2, \dots) \quad (2)$$

式中, $\varphi$ 为单位管道长度的失效率(每年每公里),下标 $k$ 表示造成管道失效的因素,如外部活动、制造缺陷、腐蚀、地表活动等, $\varphi_k$ 由因素 $k$ 导致的管道基本失效率(每年每公里), $K_k$ 表示为因素 $k$ 对应的修正函数,其中 $a_1, a_2, \dots$ 为修正函数的自变量。

大部分学者<sup>[7-14]</sup>采用可靠度或失效概率对管道可靠性的进行评价。管道可靠度定义为一定长度(通常选1 km或1 mile)的管道在规定的时段(一年)内能够满足其全部设计要求的概率。可靠度 $R$ 与相同时段内的失效概率 $P_f$ 之间的关系为:

$$R = 1 - P_f \quad (3)$$

也有学者<sup>[15-17]</sup>基于结构可靠性的理论,采用可靠指标(reliability index) $\beta$ 衡量天然气管道的安全程度,其与

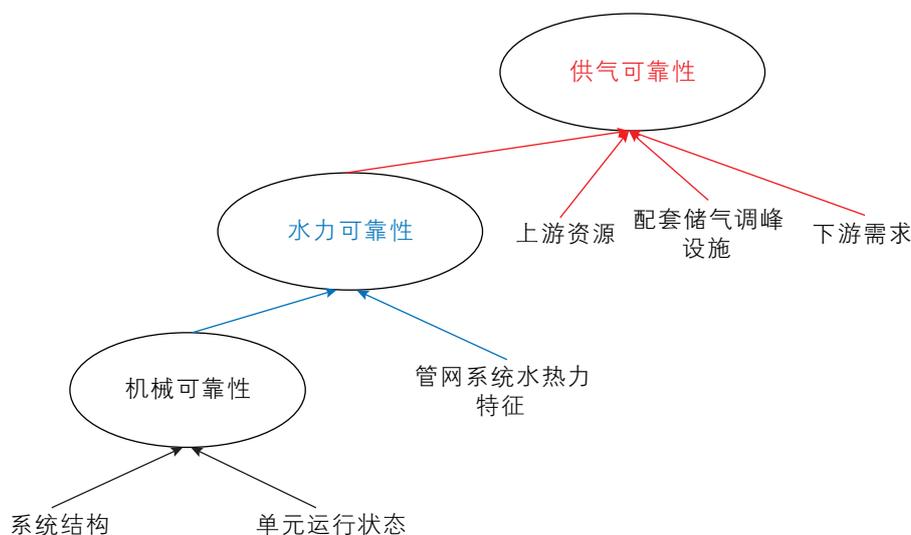


图2 管网机械可靠性、水力可靠性和供气可靠性的关系

Fig. 2 Relationship of mechanical reliability, hydraulic reliability, and gas supply reliability.

失效概率的关系如下式所示:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

式中,  $\Phi$  为标准正态分布的累积分布函数。

上述可靠度、失效概率和可靠指标, 只是对单元或系统在规定条件和时间内保持正常运行状态的能力进行描述, 适用于描述不可修复单元或系统。实际工程中, 天然气管网系统中单元一般是具有可修复性, 因此采用使用可用度 ( $A_o$ ) 指标对系统机械可靠性进行衡量。使用可用度定义为系统或单元在规定的真实使用条件下工作时, 能响应使用命令并满意工作的概率。系统的使用可用度与系统的可靠性、维修性以及保障性均相关, 其关系如图 3 所示<sup>[18]</sup>。

文献<sup>[19]</sup>采用可用度指标对天然气管网系统的机械可靠性进行评价, 其使用可用度  $A_o$  可以表示为

$$A_o = \frac{MTTF}{MTTF + MDT} \quad (5)$$

式中,  $MTTF$ (Mean Time to Failure) 为平均无故障时间,  $MDT$ (Mean Downtime) 为平均维修停机时间, 包括主动维修时间、保障延误时间和管理延误时间。用于可修复系统的常见的概念还有  $MTTR$ (Mean Time to Repair) 平均修复时间和  $MTBF$ (Mean to Between Failure) 平均失效间隔时间。

假设平均无故障时间即正常运行时间 ( $MTTF$ ) 是独立的且服从故障率  $\lambda$  的指数分布, 平均维修停机时间 ( $MDT$ ) 为独立的且服从参数  $\mu$  的指数分布, 则可用度可以写成:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (6)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时

$$\begin{aligned} A &= \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \\ &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} \\ &= \frac{MTTF}{MTTF + MDT} = A_o \end{aligned} \quad (7)$$

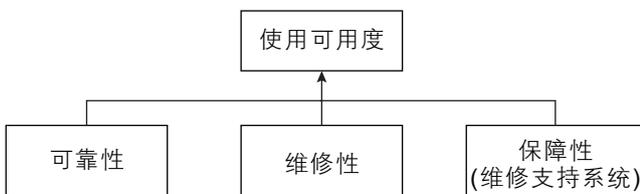


图 3 可用度与可靠性、维修性和保障性的关系  
Fig. 3 The availability as a function of the reliability, the maintainability, and the maintenance support.

为了综合考虑系统失效概率和相应失效后果, 国内外学者<sup>[4-6, 13, 20]</sup>采用风险指标对机械可靠性进行衡量。其中风险包括个人风险、社会风险和经济风险三种类型。风险可由下式计算得到:

$$Risk = P_f \times C \quad (8)$$

式中,  $Risk$  表示为管段风险,  $P_f$  表示为管道事故的失效概率,  $C$  表示为管段事故的失效后果。

文献<sup>[4]</sup>给出了天然气管道系统中某一个具体管段的个人风险和社会风险的计算表达式, 其中个人风险:

$$IR = \sum_i \int_{l_-}^{l_+} \varphi_i P_i dL \quad (9)$$

式中, 下标  $i$  表示不同的事故类型,  $\varphi_i$  为第  $i$  种事故类型的单位长度和年的失效率,  $L$  为管道长度,  $P_i$  为第  $i$  种事故的致死率,  $l_-$  和  $l_+$  表示事故的影响区域。

社会风险为:

$$F = \sum_i \int_0^L \varphi_i u(N_i \geq N) dL \quad (10)$$

式中,  $N_i$  为第  $i$  种事故可能致死人数,  $u(N_i \geq N)$  为单位阶跃函数, 当  $N_i \geq N$  时, 函数值为 1, 当  $N_i < N$  时, 函数值为 0。

文献<sup>[5]</sup>研究了管道失效造成的经济风险, 其由管网系统供气不足的概率以及所造成的后果共同决定。

## 2 管网系统水力可靠性评价指标

天然气管网水力可靠性是指系统在规定时间和条件下, 完成规定的供气任务的能力, 用于对系统的供气能力进行评价。文献<sup>[21]</sup>提出采用输出可用度  $A^T$ 、载流可用度  $A^o$  以及时刻  $t$  水平  $c$  的可用度  $A_c(t)$  等指标对油气生产运输系统的水力可靠性进行评价。

对于输出可用度  $A^T$ , 定义为期望输出量与目标输出量的比值, 如下式所示:

$$A^T = \frac{E \int_J \varphi(X(t)) dt}{\int_J D(t) dt} \quad (11)$$

式中,  $E$  表示期望,  $\varphi(X)$  表示系统处于状态  $X$  时的系统实际输出量,  $J$  表示所研究的时间周期,  $D(t)$  表示系统的目标需求量。

对于载流可用度  $A^o$ , 定义为系统实际输出量大于 0 的期望时间与整个时间周期的比值, 如下式所示:

$$A^o = \frac{1}{|J|} E \int_J I(\varphi(X(t)) \geq 0) dt \quad (12)$$

对于时刻  $t$  水平  $c$  的可用度  $A_c(t)$ , 定义为系统实际输出

量大于或等于水平  $c$  的概率, 如下式所示:

$$A_c(t) = \Pr\{\varphi(X(t)) \geq c\} \quad (13)$$

文献<sup>[22]</sup>采用节点可靠度  $R_{nj}$ , 系统体积可靠度  $R_v$ , 对燃气管网系统的水力可靠性进行表征。节点可靠度  $R_{nj}$ , 定义为评价周期内, 某供气点所有状态下总供气量与任务气量之比, 其表达式为:

$$R_{nj} = \frac{\sum_s V_{js}^{avl}}{\sum_s V_{js}^{req}} = \frac{\sum_s Q_{js}^{avl} t_{js}}{\sum_s Q_{js}^{req} t_{js}} \quad (14)$$

式中,  $t_s$  表示状态持续时间;  $V^{avl}$  表示供气量,  $V^{req}$  表示为任务气量;  $j$  表示为节点编号。

对于系统体积可用度  $R_v$ , 定义为评价周期内所有供气点、所有状态下总供气量与任务气量之比, 其表达式为:

$$R_{vj} = \frac{\sum_s \sum_j V_{js}^{avl}}{\sum_s \sum_j V_{js}^{req}} = \frac{\sum_s \sum_j Q_{js}^{avl} t_{js}}{\sum_s \sum_j Q_{js}^{req} t_{js}} \quad (15)$$

与文献<sup>[22]</sup>类似, 文献<sup>[23]</sup>对城市燃气管网的水力可靠性进行了分析, 提出节点水力可靠度  $R_j$  和系统水力可靠度  $R_{net}$  用于对管网系统的水力可靠性进行衡量, 具体的计算公式如下:

$$R_j = \frac{Q_j^{avl}}{Q_j} \quad (16)$$

$$R_{net} = \frac{\sum_n Q_j^{avl}}{\sum_n Q_j} \quad (17)$$

式中,  $j$  是系统中的消费节点;  $R_j$  是第  $j$  个节点的水力可靠度;  $Q_j^{avl}$  为节点  $j$  的供气量;  $Q_j$  为节点  $j$  的任务供气量;  $n$  是系统中消费节点的总数。

文献<sup>[24]</sup>采用式(18)所示指标  $K_{rel}$  对天然气长输管道系统水力可靠性进行评价:

$$K_{rel} = \frac{M\xi}{q_0} \quad (18)$$

式中,  $M\xi$  为系统的期望输气量,  $q_0$  为系统的名义输气量。

本文作者<sup>[25]</sup>从时间和气量两个维度对水力可靠性进行评价, 提出供气满意度 (Gas supply satisfaction)  $S_a$  和供气保障度 (Gas supply Supportability)  $S_u$  对系统水力可靠性进行评价<sup>[108]</sup>。供气满意度基于时间维度, 其定义为系统按任务流量供气的时间 ( $T_{actual}$ ) 与任务时间 ( $T_{mission}$ ) 的比值; 而供气保障度基于气量维度, 其定义为系统能够输送的气量 ( $V_{actual}$ ) 与任务气量 ( $V_{mission}$ ) 的比值。

对于第  $i$  个供气节点, 供气满意度计算公式如下所示:

$$S_a^i = \frac{T_{actual}^i}{T_{mission}} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} T_{actual}^{i,k,j}}{T_{mission}} \quad (19)$$

供气保障度计算公式如下所示:

$$S_u^i = \frac{V_{actual}^i}{V_{required}^i} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} V_{actual}^{i,k,j}}{V_{required}^i} \quad (20)$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} \int_0^{\Delta T^{k,j}} Q_{actual}^{i,k,j}(t) dt}{Q_{required}^i \cdot T_{mission}}$$

对于整个管网或管道系统而言, 供气满意度计算公式如下所示:

$$S_a = \frac{T_{actual}^{system}}{T_{mission}} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} T_{actual}^{system,k,j}}{T_{mission}} \quad (21)$$

供气保障度计算公式如下所示:

$$S_u = \frac{V_{actual}^{system}}{V_{required}^{system}} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} V_{actual}^{system,k,j}}{V_{required}^{system}} \quad (22)$$

式中,  $k$  表示管网系统的运行状态;  $N$  表示系统在任务时间内运行状态出现的个数;  $n_k$  表示某一运行状态  $k$  在任务时间出现的次数;  $T_{actual}^i$  为第  $i$  个供气点以任务流量供气的时间, h;  $T_{actual}^{i,k,j}$  指系统第  $j$  次处于状态  $k$  时, 第  $i$  个供气点以任务流量供气的时间, h;  $V_{actual}^i$  表示在任务时间内, 第  $i$  个供气点供给的气量,  $Nm^3$ ;  $V_{required}^i$  表示在任务时间内, 第  $i$  个供气点的任务供给气量,  $Nm^3$ ;  $V_{actual}^{i,k,j}$  表示系统第  $j$  次处于状态  $k$  时, 第  $i$  个供气点供给的气量,  $Nm^3$ ;  $\Delta T^{k,j}$  表示系统第  $j$  次处于状态  $k$  的时间, h;  $Q_{actual}^{i,k,j}$  表示系统第  $j$  次处于状态  $k$  时, 第  $i$  个供气点的供气流量,  $Nm^3/h$ ;  $Q_{required}^i$  表示为第  $i$  个供气点的任务供气流量,  $Nm^3/h$ ;  $T_{actual}^{system}$  表示为系统按任务流量供气的时间, h;  $T_{actual}^{system,k,j}$  表示为系统第  $j$  次处于状态  $k$  时, 按任务流量供气的时间, h;  $V_{actual}^{system}$  表示系统在任务时间供给的总气量,  $Nm^3$ ;  $V_{required}^{system}$  为系统在任务时间的任务气量,  $Nm^3$ ;  $V_{actual}^{system,k,j}$  表示为系统第  $j$  次处于状态  $k$  时供给的气量,  $Nm^3$ 。

需要指出的是, 系统的总气量与每个节点的气量满足下式:

$$V_{actual}^{system,k,j} = \sum_{i=1}^M V_{actual}^{i,k,j} \quad (23)$$

$$V_{\text{required}}^{\text{system}} = \sum_{i=1}^M V_{\text{required}}^i \quad (24)$$

而系统以任务流量供气的时间  $T_{\text{actual}}^{\text{system}}$  由下式计算可得:

$$T_{\text{actual}}^{\text{system},k,j} = \min(T_{\text{actual}}^{i,k,j}, i=1 \dots M) \quad (25)$$

### 3 管网系统供气可靠性指标

管网系统供气可靠性是指系统在规定时间和条件下能够满足用户用气需求的能力,用于表征管网系统的保障需求能力。文献<sup>[21]</sup>提出需求可用度  $A^D$ ,对油气生产运输系统的供给可靠度进行评价。对于需求可用度,定义为系统实际输出量大于或等于需求量的期望时间与整个时间周期的比值,如下式所示:

$$A^D = \frac{1}{|J|} E \int_J I(\varphi(X(t)) \geq D(t)) dt \quad (26)$$

式中符号意义与式(11)相同。

文献<sup>[26-36]</sup>采用系统的供给气量与需求气量的比值对供气可靠性进行评价,具体的表达式为:

$$R = \frac{V_x}{V_D} \quad (27)$$

式中,  $V_x$  表示为管网的供气气量,  $V_D$  表示为天然气市场需求气量。

文献<sup>[37]</sup>借鉴电网供电可靠性的知识,将其运用于供气系统中,提出采用系统平均中断持续时间(SAIDI)和系统平均中断频率(SAIFI)来分析管道失效造成的供气不足对市场的影响。其计算公式如下所示:

$$SAIDI = \frac{\text{系统中用户供气中断时间总和}}{\text{系统中用户数量}} \quad (28)$$

$$SAIFI = \frac{\text{系统中受影响用户数量}}{\text{系统中用户数量}} \quad (29)$$

同样是借鉴电网可靠性知识,文献<sup>[38]</sup>提出系统平均短缺气量(Global average natural gas shortage),平均不满足需求用户数(Average number of unsatisfied customers)和平均气量短缺时间(Average shortage duration)来分别从天然气气量、受影响用户以及影响时间三个方面对系统的供气可靠性进行评价。文献<sup>[39]</sup>则采用失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和期望缺供能源(expected energy unserved, EEU)对天然气管网供气可靠性进行评价。

实际工程中,管网系统供气能力和市场需求在评价周期内都具有不确定性。一方面,系统供气能力随系统的运行状态和外界环境的影响而发生改变。另一

方面,市场需求受宏观经济和政策、微观价格以及环境因素影响而发生波动。因此如何同时考虑供气能力和市场需求两方面的不确定性,是供气可靠性评价指标的关键。本文作者根据供气可靠性定义,并考虑供气能力和市场需求随时间的不确定性,提出从气量和时间两个维度对供气可靠性进行评价<sup>[40-41]</sup>,计算公式如下所示:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^T C_i}{T} \quad (30)$$

式中,  $T$  为任务时间, d 或 h;  $C_i$  表示第  $i$  天或小时的满足需求情况。

当基于时间角度时,

$$C_i = \begin{cases} 1, & X_i \geq D_i \\ 0, & X_i < D_i \end{cases}$$

当基于气量角度时,

$$C_i = \begin{cases} 1, & X_i \geq D_i \\ \frac{X_i}{D_i}, & X_i < D_i \end{cases}$$

$X_i$  为第  $i$  天或小时的系统供气量,  $\text{Nm}^3$ ;  $D_i$  为第  $i$  天或小时的天然气需求量;  $T$  为任务时间, h。

### 4 结论

本文归纳和总结了已有的天然气管网系统可靠性研究成果,基于天然气管网系统的特征和功能,并考虑管网系统可靠性的实际应用需求,将管网系统可靠性分为系统机械可靠性、水力可靠性和供气可靠性,分别用于表征系统运行安全能力、完成供气任务能力和满足市场需求能力。

机械可靠性指标方面,主要包括反映单元或系统失效及维修速度的失效率和维修率;反映单元或系统保持正常运行能力的可靠度和系统处于正常工作状态的能力的可用度;综合单元或系统失效概率和相应后果的风险。系统水力可靠性指标方面,作者提出基于时间和气量两个维度分别对系统以任务流量供气的能力以及供给任务气量的能力进行评价。供气可靠性指标则需同时体现市场需求和供气能力两方面的不确定性。与水力可靠性指标类似,本文也从时间和气量两个维度分别对系统按需求流量供气的能力以及满足需求气量的能力进行评价。

单元的机械可靠性计算结果是系统机械可靠性、水力可靠性以及供气可靠性评价的基础。相对于水力可靠性和供气可靠性指标研究,机械可靠性无论是单

元角度还是管网系统层面,研究均较为成熟和丰富,但仍需要在单元失效数据库和知识库的建设上进行突破。当前系统水力可靠性的研究,大部分学者都考虑了管网系统运行状态的不确定性和水力计算的重要性,但均忽略了因天然气管存效应导致的系统慢瞬变、大时滞等的水力特征,存在缺少对天然气管输工艺深入研究的缺陷。而对于供气可靠性的研究,不仅忽略了上述水力特征,对于上游气源、配套储气调峰措施以及下游需求对供气可靠性的影响也鲜有考虑,从而导致供气可靠性的评价结果不能准确地反映系统保障需求的能力。

因此,对于天然气管网系统可靠性的研究仍需从以下两大方面进行突破。一是对管网系统可靠性计算所需要的数据库和知识库的建立,该知识库包括单元

故障失效知识库、仿真知识库以及市场需求知识库等,其能为管网系统可靠性研究提供数据和知识支撑;另一方面就是管网系统水力和供气可靠性计算模型和算法的建立和完善。油气管网是复杂、开放、大型系统,除受管道系统多因素、多单元可靠度影响外,用户在不同时间和任务条件下受介质流量、压力、温度等多因素耦合影响,使其可靠性计算成为难题。此外,管网机械可靠性、水力可靠性以及供气可靠性均可以由多个评价指标进行表征,如何对这些指标进行综合考虑,或确定各指标的权重,以满足实际工程需求,也是需要攻克的难题之一。天然气管网系统可靠性的研究人员应该从总体顶层设计出发,重点在管网系统可靠性模型和算法上进行突破,并对数据库和知识库的建设提出相应需求。

## 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. [HUANG W H. Reliability of large-scale natural gas pipeline network[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 401-404.]
- [2] 宋东昱, 严大凡. 天然气管道可靠性特征量[J]. 天然气工业, 1997, 6: 50-53. [SONG D Y, YAN D F. Reliability characteristic quantity of natural gas pipeline [J]. Natural Gas Industry, 1997, 17: 50-53.]
- [3] 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. [QU S Y. Evaluation indexes and calculations of the reliability of oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1996(4), 15, 1-4.]
- [4] JO Y D, AHN B J. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas[J]. Journal of hazardous materials, 2005, 123(1-3): 1-12.
- [5] HAN Z Y, WENG W G. An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(3): 428-436.
- [6] HAN Z Y, WENG W G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network[J]. Journal of hazardous materials, 2011, 189(1-2): 509-518.
- [7] 温凯, 张文伟, 宫敬, 等. 天然气管道可靠性的计算方法[J]. 油气储运, 2014, 33(7): 729-733. [WEN K, ZHANG W W, GONG J, et al. Computation of gas pipeline reliability[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(7), 729-733.]
- [8] LI S X, YU S R, ZENG H L, et al. Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2009, 65(3): 162-166.
- [9] ZHOU W. System reliability of corroding pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2010, 87(10): 587-595.
- [10] DUNDULIS G, ŽUTAUTAITE I, JANULIONIS R, et al. Integrated failure probability estimation based on structural integrity analysis and failure data: Natural gas pipeline case[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 156: 195-202
- [11] LAM C, ZHOU W. Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2016, 145: 29-40.
- [12] 虞维超, 薛鲁宁, 黄维和, 等. 储气库可靠性一体化分析方法研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(1): 102-114. [YU W C, XUE L N, HUANG W H, et al. An integration method for evaluating the operating reliability of underground natural gas storage[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(1): 102-114.]
- [13] WANG H, DUNCAN I J. Likelihood, causes, and consequences of focused leakage and rupture of US natural gas transmission pipelines[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2014, 30: 177-187.
- [14] YU W, ZHANG J, WEN K, et al. A novel methodology to update the reliability of the corroding natural gas pipeline by introducing the effects of failure data and corrective maintenance[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 169: 48-56.
- [15] ZHANG S, ZHOU W. An efficient methodology for the reliability analysis of corroding pipelines[C]//2012 9th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2012: 683-692.
- [16] TEIXEIRA A P, SOARES C G, NETTO T A, et al. Reliability of pipelines with corrosion defects[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2008, 85(4): 228-237.

- [17] GONG C, ZHOU W. Improvement of equivalent component approach for reliability analyses of series systems[J]. *Structural Safety*, 2017, 68: 65–72.
- [18] RAUSAND M, HØYLAND A. *System reliability theory: Models, statistical methods, and applications*[M]. John Wiley & Sons, 2004.
- [19] SANTOS S P D, BITTENCOURT M A S, VASCONCELLOS L D. Compressor station availability: Managing its effects on gas pipeline operation[C]// 2006 6th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2006: 855–863.
- [20] WITEK M, BATURA A, ORYNYAK I, et al. An integrated risk assessment of onshore gas transmission pipelines based on defect population[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 150–165.
- [21] AVEN T. Availability evaluation of oil/gas production and transportation systems[J]. *Reliability Engineering*, 1987, 18(1): 35–44.
- [22] 梁光川, 罗敏, 张川东, 等. 输气管网的水力可靠性分析方法[J]. *天然气工业*, 2006, 26(4): 125–127. [LIANG G C, LUO M, ZHANG C D, et al. Analysis methods for hydraulic credibility of gas transmission pipeline networks[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(4): 125.]
- [23] LI J, QIN C, YAN M Q, et al. Hydraulic reliability analysis of an urban loop high-pressure gas network[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 28: 372–378.
- [24] SUKHAREV M G, KARASEVICH A M. Reliability models for gas supply systems[J]. *Automation & Remote Control*, 2010, 71(7): 1415–1424.
- [25] YU W, WEN K, MIN Y, et al. A methodology to quantify the gas supply capacity of natural gas transmission pipeline system using reliability theory[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 175: 128–141.
- [26] PRAKS P, KOPUSTINSKAS V, MASERA M. Probabilistic modelling of security of supply in gas networks and evaluation of new infrastructure[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 144: 254–264.
- [27] 孔文惠. 陕京输气系统对北京地区的供气可靠性研究. [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [KONG W H. The reliability of Shan-Jing pipelines' gas supply for Beijing market [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [28] 刘文超. 基于图论的我国天然气管网可靠性研究. [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [LIU W C. China natural gas pipe network reliability research based on graph theory[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [29] MONFORTI F, SZIKSZAI A. A MonteCarlo approach for assessing the adequacy of the European gas transmission system under supply crisis conditions[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(5): 2486–2498.
- [30] SZIKSZAI A, MONFORTI F. GEMFLOW: A time dependent model to assess responses to natural gas supply crises[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 5129–5136.
- [31] OLANREWAJU O T, CHAUDRY M, QADRAN M, et al. Vulnerability assessment of the European natural gas supply[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 2015, 168(1): 5–15.
- [32] 范慕炜, 宫敬, 伍阳, 等. 基于简化拓扑结构的陕京天然气管网供气可靠性分析[J]. *天然气工业*, 2017, 37(4). [FAN M W, GONG J, WU Y, et al. Gas supply reliability analysis of the Shaanxi-Beijing gas pipeline network based on the simplified topological structure[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 123–129.]
- [33] FAERTES D, HEIL L, SAKER L, et al. Reliability modelling – PETROBRAS 2010 integrated gas supply chain[C]// 2010 8th International Pipeline Conference. Calgary, Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2010: 497–505.
- [34] FAERTES D. Reliability of supply chains and business continuity management [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 55: 1400–1409.
- [35] FAN M W, GONG J, WU Y, et al. The gas supply reliability analysis of natural gas pipeline network based on simplified topological structure[J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2017, 9(4): 045503.
- [36] 范慕炜. 陕京天然气管网系统可靠度计算方法研究. [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. [FAN M W. Study on reliability calculation of Shan-Jing natural gas pipeline network system[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.]
- [37] RIMKEVICIUS S, KALIATKA A, VALINCIUS M, et al. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems[J]. *Applied Energy*, 2012, 94(6): 22–33.
- [38] SU H, ZHANG J, ZIO E, et al. An integrated systemic method for supply reliability assessment of natural gas pipeline networks[J]. *Applied Energy*, 2018, 209: 489–501.
- [39] CHAUDRY M, WU J, JENKINS N. A sequential Monte Carlo model of the combined GB gas and electricity network[J]. *Energy Policy*, 2013, 62: 473–483.
- [40] YU W, SONG S, LI Y, et al. Gas supply reliability assessment of natural gas transmission pipeline systems[J]. *Energy*, 2018, 162: 853–870.
- [41] YU W, WEN K, LI Y, et al. A methodology to assess the gas supply capacity and gas supply reliability of a natural gas pipeline network system[C]//2018 12th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2018: V002T07A006–V002T07A009.