

# 基于可靠性方法的大口径天然气管段壁厚设计

陈严飞<sup>1\*</sup>, 王春莎<sup>1</sup>, 董绍华<sup>2</sup>, 侯富恒<sup>1</sup>, 李兴涛<sup>3</sup>

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)管道技术与安全研究中心, 北京 102249

3 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100029

\* 通信作者, ychen@cup.edu.cn.

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2023-05-09

国家自然科学基金(51779265, 52171285)、中国石油大学(北京)科研基金(编号: 2462020YXZZ045)、中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项: “一带一路”海外长输管道完整性关键技术研究与应(用)(ZLZX2020-05)联合资助

**摘要** 我国陆上天然气管道规模庞大, 管道路由地形、地貌和气候特征复杂多样。面对管道及管道所处环境的复杂性, 提高油气管道的本质安全水平是行业和民众的共同需求, 保证陆上天然气管道安全和可靠运行也越来越成为行业关注的焦点。为达到这个目标, 可以采用从源头上对陆上天然气管道的设计方法进行改进的办法。目前天然气管道设计大多普遍利用传统的基于应力的设计方法, 该方法由于采用单一的安全系数导致油气管道的安全裕度难以考量, 针对此问题, 基于可靠性的油气管道设计和评估方法(Reliability Based Design and Assessment, 简称RBDA)正成为现代陆上天然气管道设计的趋向, 该方法可量化管道全生命周期中的风险, 避免采用不合理或过于保守的设计标准。故本研究综合 CSA Z662《油气管道系统》标准规范的油气管道可靠性设计方法, 并结合国内部分机构根据我国国情而修正的可靠性研究, 利用RBDA方法流程, 根据某段实际天然气管道确定该管道失效的主要原因(以腐蚀和第三方破坏为主), 设计了管道在其生命周期内的极限状态, 根据极限状态选择对应的极限状态方程类型, 并利用多种数据统计分析方法和软件确定方程中所涉及各个随机变量参数的分布类型, 之后利用蒙特卡洛法(Monte-Carlo法)计算设计壁厚条件下得到天然气管道失效概率, 统筹考虑其他失效原因的权重, 进而得到该管道的可靠度, 将该可靠度数据与国内外标准规范确定的目标可靠度进行对比, 检验是否满足可靠度目标。由此, 对大口径天然气管段完成壁厚设计, 实现了使用RBDA方法对 1016 mm 大口径天然气管道设计的整体流程。

**关键词** 天然气管道; 可靠性; 极限状态; 管道壁厚; 蒙特卡洛法

中图分类号: TE 832; TE 973

## Design of the wall thickness of a certain large diameter natural gas pipeline using a reliability method

CHEN Yanfei<sup>1</sup>, WANG Chunsha<sup>1</sup>, DONG Shaohua<sup>2</sup>, HOU Fuheng<sup>1</sup>, LI Xingtao<sup>3</sup>

*1 School of Mechanical and Storage Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

引用格式: 陈严飞, 王春莎, 董绍华, 侯富恒, 李兴涛. 基于可靠性方法的大口径天然气管段壁厚设计. 石油科学通报, 2024, 09(05): 831-840  
CHEN Yanfei, WANG Chunsha, DONG Shaohua, HOU Fuheng, LI Xingtao. Design of the wall thickness of a certain large diameter natural gas pipeline using a reliability method. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(05): 831-840. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.064

2 Pipeline Technology and Safety Research Center, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100029, China

Received: 2022-09-13; Revised: 2023-05-09

**Abstract** The scale of onshore natural gas pipelines in China is huge, and the pipeline routes have complex and diverse terrain, landforms, and climate characteristics. Faced with the complexity of pipelines and the environment in which they operate, improving the intrinsic safety level of oil and gas pipelines is a common demand of the industry and the public. Ensuring the safe and reliable operation of onshore natural gas pipelines has become an increasingly important focus of industry attention. To achieve this goal, it is possible to improve the design method of onshore natural gas pipelines from the source. At present, traditional stress based design methods are widely used in natural gas pipeline design. Due to the use of a single safety factor, it is difficult to consider the safety margin of oil and gas pipelines. To address this issue, Reliability Based Design and Assessment (RBDA) is becoming a trend in modern onshore natural gas pipeline design. This method can quantify the risks throughout the entire life cycle of the pipeline and avoid using unreasonable or overly conservative design standards. Therefore, this study integrates the reliability design method of the CSA Z662 "Oil and Gas Pipeline System" standard specification for oil and gas pipelines, and combines it with the reliability research revised by some domestic institutions according to China's national conditions. Using the RBDA method process, the main causes of pipeline failure (mainly corrosion and third-party damage) are determined based on a certain section of actual natural gas pipeline. The limit state of the pipeline is designed during its life cycle, and the corresponding limit state equation type is selected based on the limit state. Multiple data statistical analysis methods and software are used to determine the distribution types of various random variable parameters involved in the equation. Then, the Monte Carlo method is used to calculate the failure probability of the natural gas pipeline under the design wall thickness condition, and the weights of other failure causes are considered comprehensively to obtain the natural gas pipeline failure probability. The reliability of the pipeline, Compare the reliability data with the target reliability determined by domestic and foreign standard specifications to verify whether it meets the reliability target. Thus, the wall thickness design of the large-diameter natural gas pipeline section was completed, realizing the overall process of using RBDA method for the design of 1016mm large-diameter natural gas pipelines.

**Keywords** natural gas pipeline; reliability; limit state; pipe wall thickness; Monte Carlo method

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.064

## 0 引言

以往的天然气管道壁厚设计大多是利用传统的基于应力的设计方法。为了给管道留出一定的失效裕度,设计安全系数往往是根据工程经验确定的单一数值,设计结果趋于保守。然而在实际工程中,管道的出厂管径、壁厚、屈服强度以及运行内压等参数存在不确定性<sup>[1]</sup>,且由于地质灾害、第三方破坏以及人口、城乡的发展等,管道周边的环境也在不断变化。这些随机变量在最初设计中没有得到明确考虑,并且都不能通过任意增加不考虑管道具体属性的“安全系数”来解决,这大大提高了管道失效的风险。

因此,发展可靠性设计方法,充分考虑管道生产与运行中的随机变量,综合考虑安全、可靠和经济性,研究可靠性方法的适用性对提高油气管道的运行可靠性具有重要意义。

现代设计方法“基于可靠性的设计和评估法”能够综合考虑各种随机变量与外部环境的影响,对结构的安全性水平进行了量化<sup>[2]</sup>。在过去几十年,基于可靠性的设计原则已经被用于许多行业(例如核容器、桥梁和建筑物)中<sup>[3]</sup>。而在天然气管道方面,虽然目前

有很多学者对此进行了研究,但是大多处于理论层面,只有少部分研究机构推进了RBDA方法在实际工程中的应用。国内中石油开展过“天然气管道基于可靠性的设计与评价技术”专题研究,形成了较为完整的可靠性设计流程<sup>[4]</sup>;加拿大C-fer公司和W Zhou等人重点对RBDA方法的极限状态方程进行修改和完善,也对管道受损害情况等进行了大量调查和研究,得出腐蚀和第三方破坏是管道失效的主要原因,为总失效概率的计算提供了一定依据<sup>[5-6]</sup>。

目前,国内已有研究人员对小口径管道进行了设计和优选<sup>[7]</sup>,而缺乏对大口径管道的设计研究。X70管线钢的焊接技术实现国产化<sup>[8]</sup>,仍是目前主流应用的钢管<sup>[9]</sup>。管道设计的初始工作是壁厚设计,故本研究针对某X70大口径天然气管段,在考虑腐蚀和第三方破坏参数的基础上,确定了各随机变量的概率分布模型以及极限状态类型,并针对我国人口密度分布特点利用修正的目标可靠度的计算方式,最终通过蒙特卡洛法计算出不同参数下管道的可靠度,得到符合目标可靠度要求的壁厚<sup>[10]</sup>。本文的技术路线如图1所示,研究成果能够为高钢级大口径天然气管道设计提供一定的参考。

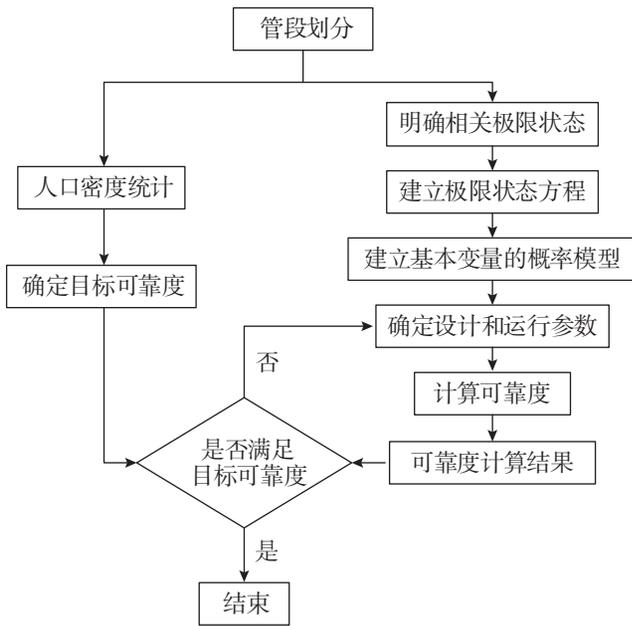


图 1 RBDA 技术路线  
Fig. 1 Technical route of RBDA

### 1 管道基础参数

选取某天然气管段为例，长度 80.56 km，设计运行压力 10 MPa，管材为 X70 级，管材出厂要求的最小屈服强度为 485 MPa，管道外径 1016 mm。依据 CSA Z662 附录 O 中对管道输送流体的要求，当管道内输送的天然气泄漏到大气中时，大气中的硫化氢浓度需低于 10 μmol/mol (10 ppm)。管道根据地区等级和管道损坏情况划分为 4 段，分别编号为 P01~P04。按地区等级划分时，已经充分考虑了管道沿线人口密度情况和

表 1 管段划分  
Table 1 Pipeline division

管道编号	起始里程/km	终止里程/km	管道长度/km	地区等级	损坏情况
P01	0	34.58	34.58	二级地区	轻度腐蚀
P02	34.58	48.74	14.16	三级地区	轻度腐蚀
P03	48.74	65.42	16.68	二级地区	中度腐蚀穿孔
P04	65.42	80.56	15.14	二级地区	轻度屈曲

表 2 极限状态分析  
Table 2 Limit state design

序号	失效原因	极限状态	极限状态分类	时间依赖性
(1)	设备撞击	刺穿	ULS	否
(2)	内压	腐蚀缺陷处大的泄漏	ULS	否
(3)	内压	腐蚀缺陷处破裂	ULS	否

沿线发展规划。其中，腐蚀缺陷均为内腐蚀，成因为电化学腐蚀；穿孔的成因是挖掘机施工过程不慎将管道刺穿；屈曲的成因为地面轻度沉降。如表 1 所示。

### 2 极限状态分析

#### 2.1 极限状态的类型

由表 1 可知，P03 管段存在中度腐蚀以及管道穿孔等缺陷，管道的完整性受到严重破坏，极易发生失效事故，因此在进行极限状态分析时，需要重点考虑 P03 管段。依照 CSA Z662 中“陆上管道荷载情况和极限状态列表”，针对 P03 管段可能发生的失效类型，判断出该管段可能面临的 3 种常见极限状态，见表 2 所示。

(1) 第一类极限状态是由于设备撞击导致管道被刺穿，在工程中最常见的情况是挖掘机施工挖穿管道，管道发生大泄漏，不能继续服役，达到最终极限状态；

(2) 第二类极限状态是管道受其他原因产生腐蚀缺陷(缺陷较大)，在腐蚀缺陷处有较大的天然气泄漏，管道处于最终极限状态；

(3) 第三类极限状态是管道出现腐蚀缺陷(缺陷较大)，同时由于内压作用，腐蚀缺陷处产生爆裂，导致大量天然气泄漏，比第二类极限状态要更加严重，属于最终极限状态。

除了这 3 类极限状态，其余因素均对管道失效概率影响较小，所以可以忽略。

#### 2.2 极限状态方程

在可靠性设计中，应根据抗力和载荷的功能函

数, 针对管道所处的极限状态建立相应的极限状态方程<sup>[11]</sup>。本案例下, 根据2.1节中划分的3种极限状态, 选择CSA Z662中对应的3种极限状态方程用于计算。

(1) 管道刺穿极限状态方程:

$$g = r_a - q \quad (1)$$

$$r_a = \frac{(1.17 - \frac{0.0029D}{t})(l_i + w_i)t\sigma_u}{1000} + e \quad (2)$$

$$q = 8.09w^{0.922}R_D R_N \quad (3)$$

式中:  $D$ 为管道直径, mm;  $r_a$ 为管材抗力值, kN;  $q$ 为挖掘机作用力, kN;  $\sigma_u$ 为管材抗拉强度, kN;  $w$ 为挖掘机的质量, t;  $l_i$ 为斗齿齿尖长度, mm;  $w_i$ 为斗齿齿尖宽度, mm;  $e$ 为模型的误差项,  $e \sim N(0.883, 16.7)$ , kN;  $R_D$ 为冲击力法向分力系数,  $R_D \sim U(0, 1)$ ;  $R_N$ 为冲击系数, 取2/3。

(2) 管道腐蚀—塑性破坏(大量泄漏)的极限状态方程:

$$g = r_a - P \quad (4)$$

$$r_a = \begin{cases} e_1 r_c + (1 - e_1)r_0 - e_2 \sigma_u, & SMYS > 241 \text{ MPa} \\ e_3 r_c + (1 - e_3)r_0 - e_4 \sigma_y, & SMYS < 241 \text{ MPa} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $r_a$ 为抗力计算值, MPa;  $P$ 为设计压力, MPa;  $r_0$ 为完整管道的抗力, MPa;  $M_T$ 为Folas因子;  $e_1$ 为乘法模型误差;  $e_2$ 为加法模型误差,  $e_2 \sim N(-0.00056, 0.001469)$ ;  $e_3$ 为乘法模型误差, 值为1.17;  $e_4$ 为加法模型误差,  $e_4 \sim N(-0.007655, 0.006506)$ 。

(3) 管道腐蚀—由于大量泄漏导致爆裂的极限状态方程:

$$g = \frac{1.8t\sigma_u}{M_T \times D} - P, \quad SMYS > 241 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$g = \frac{2.3t\sigma_y}{M_T \times D} - P, \quad SMYS \leq 241 \text{ MPa}$$

### 3 确定基本变量

#### 3.1 确定基本变量的概率模型

在管道结构可靠性分析中, 变量参数不确定性分析是前期基础<sup>[12]</sup>。对于收集到的管材强度、腐蚀尺寸等参数, 要通过数理统计工具对变量参数进行统计分析, 选择合适的概率分布模型和函数, 对每一种变量参数采用拟合度最高的概率分布类型, 确定最终的分布类型和特征值<sup>[13-14]</sup>。本研究采用某长输管道内检测所得腐蚀缺陷深度数据为例以演示数据处理过程。数据处理过程主要分为以下5步。

第1步: 利用excel或者箱线图, 初步整理筛选数据, 剔除异常点。

第2步: 绘制缺陷深度直方图, 以初步显示缺陷深度的分布规律, 如图2所示。

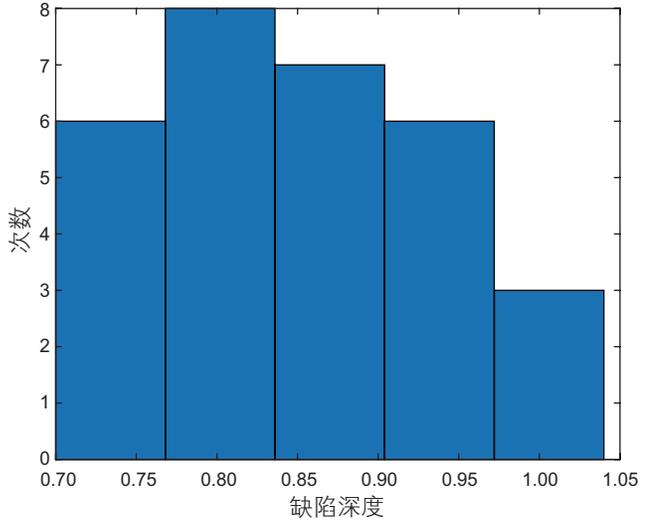


图2 原始数据直方图

Fig. 2 Raw data histogram

第3步: 基于统计分析软件SPSS, 根据腐蚀缺陷深度数据绘制预测累积概率P-P图(图3), 检验数据是否服从指定的分布<sup>[15]</sup>。可以看出, 缺陷深度数据与指数分布吻合度差, 而正态分布、Weibull分布和Gamma分布的数据点和理论直线(对角线)较为重合, 且去趋势P-P图的残差上下波动不大, 数据更倾向于这3种分布。

第4步: 软件拟合正态分布、Weibull分布和Gamma分布的概率密度曲线如图4。可以发现, 腐蚀深度数据的频率直方图与3种分布的概率密度曲线趋势相同, 在此验证第3步的结论。

第5步: 观察上述步骤得到的分布规律, 利用SPSS中的K-S检验功能验证分布类型。例如, 检测数据是否服从正态分布, K-S检验结果的渐进显著性为 $0.2 > 0.05$ , 确定可以接受原假设, 即可以认为缺陷深度数据服从正态分布。

SPSS软件中K-S检验只针对正态分布、指数分布、泊松分布和均匀分布, 不能检验Weibull分布和Gamma分布, 故利用MATLAB的kstest函数进行检验<sup>[16]</sup>, 得到 $h$ 值和 $K-S$ 值, 见表4。可见, 3种分布 $h$ 值均为0, 所以可以在显著性水平为0.05的情况下接受原假设; 正态分布的 $K-S$ 值为三者最小, 即证明腐蚀缺陷深度用正态分布来模拟是合适的。

综合以上分析, 腐蚀缺陷深度数据服从正态分布, 均值为0.848, 标准差为0.094。其他参数的处理均可

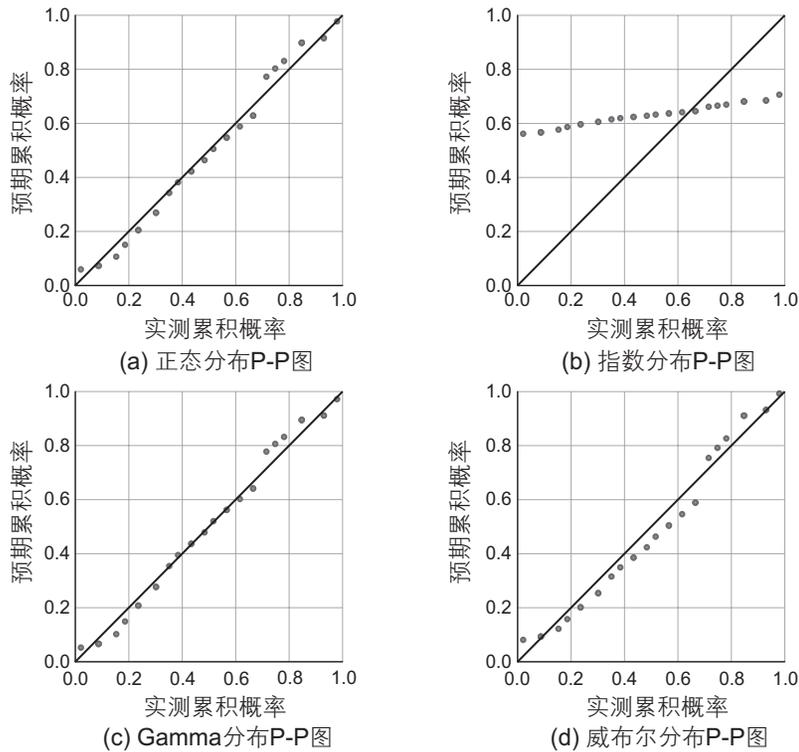


图3 P-P图绘制

Fig. 3 P-P diagram drawing

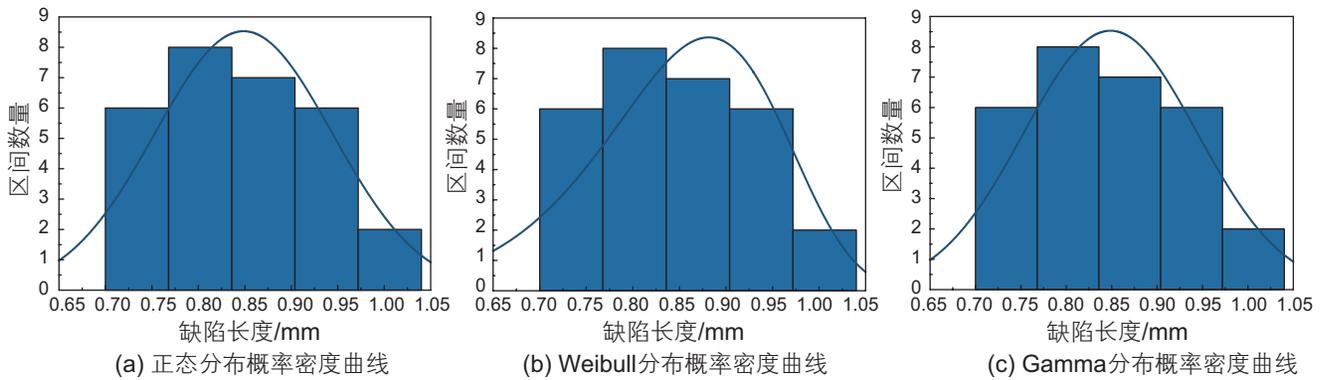


图4 拟合概率密度曲线

Fig. 4 Fitting probability density curve

表3 单样本K-S检验表

Table 3 Single sample K-S test sheet

单一样本Kolmogorov-Smirnov 检定		
常能参数	平均数	0.848
	标准偏差	0.094
	绝对	0.093
最极端差异	正	0.064
	负	-0.093
检验统计		0.093
渐进显著性(双尾)		0.2 <sup>(1,2)</sup>

<sup>1</sup> 已校正Lilliefors显著更正

<sup>2</sup> 这是真正的显著性下限

表4 腐蚀缺陷深度假设检验

Table 4 Defect depth hypothesis test

参数	分布形式	$h$ 值	K-S值	判断	最优分布
腐蚀深度	威布尔	0	0.11363	满足	正态分布
	Gamma	0	0.09843	满足	
	正态	0	0.09828	满足	

采用上述步骤进行。

### 3.2 其它参数的确定

根据工程经验,管道压力不断波动,但波动幅度不大,因此可被视为定值。管道直径的方差较小,也可被视为定值。根据《ASME B36.10M-2015》焊接和无缝轧制钢管标准,外径 1016 mm 的钢管一共对应 19 种壁厚,从 7.92 ~ 31.75 mm(壁厚的均值  $t_{\text{mean}}$ )不等。由此,管道确定参数如表 5 所示。

根据工程经验和 CSA Z662 标准中推荐的 Zimmerman 研究<sup>[17]</sup>,管道壁厚的方差可认为是均值的 0.1 倍。另外,研究人员根据现场试验和工作经验,给出了管材参数和挖掘机设备各类随机变量概率密度分布类型<sup>[4,18]</sup>。本研究计算管道可靠度用到的参数分布类型如表 6 所示。

需要说明的是, RBDA 方法计算可靠度需要大量的数据处理工作,需要从项目设计文件、实际施工和已建成项目中统计数据,包括前期勘察、设计图纸、全尺寸爆破试验、运行维护数据、缺陷统计和内外检测等方面。

## 4 目标可靠度

目标可靠度是对特定极限状态或一类极限状态可接受的最小可靠度水平,它等于 1 减去最大允许失效概率。

表5 管道确定性参数

Table 5 Pipeline deterministic parameter

管道直径/mm	管道运行压力/MPa
1016	10

表6 参数分布类型

Table 6 Parameter distribution type

管道壁厚/mm	抗拉强度/MPa	腐蚀深度/mm	腐蚀长度/mm	斗齿长度/mm	斗齿宽度/mm
(7.92~31.75, $0.1 \times t_{\text{mean}}$ )	正态(627, 18.8)	正态(0.848, 0.094)	对数正态(15, 7.5)	矩形(119, 40)	矩形(3.5, 0.89)

### 4.1 CSA Z662 目标可靠度

(1) ULS(Ultimate Limit State, 最终极限状态)目标可靠度

该标准以 2 万 km 加拿大天然气输送管道周边实际人口数据为基础,测量区域以管道中心线向两侧延伸特定等距离,延伸长度为 60 m 和  $0.2\sqrt{PD^2}$  (m) 中较大者,长度为 1600 m,平行于管道轴线测量<sup>[19]</sup>。

CSA Z662 中的目标可靠度被定义为人口密度、压力和管径的函数,见式(7)。代入基础参数得到的目标可靠度见表 7。

$$R_T = \begin{cases} 1 - \min\left(\frac{1650}{(PD^3)^{0.66}}, 10^{-3}\right), & \rho = 0 \\ 1 - 10^{-3}, & 0 < \rho PD^3 \leq 4.97 \times 10^7 \\ 1 - \frac{49700}{\rho PD^3}, & 4.97 \times 10^7 < \rho PD^3 \leq 7.1 \times 10^9 \\ 1 - \frac{4.05 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.6}}, & \rho PD^3 > 7.1 \times 10^9 \end{cases} \quad (7)$$

可靠度和失效概率之间的关系是

$$P = 1 - R_T \quad (8)$$

(2) 天然气管道 SLS(Serviceability limit state, 服役极限状态)的目标可靠度为  $1 - 10^{-1}$  次/(km·a),即容许失效概率最大为  $10^{-1}$  次/(km·a)。

(3) 天然气管道 LLS(Leakage limit state, 泄漏极限状态)的目标可靠度为  $1 - 10^{-3}$  次/(km·a),即容许失效概率最大为  $10^{-3}$  次/(km·a)。

### 4.2 修正目标可靠度

为将 RBDA 方法引入并应用于中国陆上天然气管道,中国石油管道工程公司(CPPE)选取了 2 万 km 天然气管道,推断出与位置对应的人口密度。之后根据

我国国情推导出适用于我国天然气管道目标可靠度的计算公式<sup>[20]</sup>。修正的目标可靠度为公式(9)，人口密度及目标可靠度数据见表8。

$$R_T = \begin{cases} 1 - \frac{775}{(PD^3)^{0.63}} & , \rho = 0 \\ 1 - \frac{9.96}{(\rho PD^3)^{0.59}} & , \rho PD^3 \leq 4.7 \times 10^9 \\ 1 - \frac{9.3 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.65}} & , \rho PD^3 > 4.7 \times 10^9 \end{cases} \quad (9)$$

### 5 可靠度计算

可靠度计算是对每个极限状态进行计算进而得到的可靠性水平，计算值大于第4节中要求的目标可靠度水平才能满足设计要求。计算管道可靠度采用Monte Carlo法，根据随机变量 $X_i(i=1, 2, \dots, m)$ 的

概率分布形式产生 $M$ 个随机数，用于极限状态方程的计算，当 $M$ 足够大，根据概率统计理论，失效频率与概率接近，以此得到失效概率。Monte Carlo法计算结果更加精确，可以对涉及到的数学方面的困难进行简化，而且与实际情况贴合，是目前许多学者计算概率常用的方法<sup>[21]</sup>。

计算思路为：为保证计算精度，设置循环次数为 $10^8$ ，以第三方破坏极限状态方程为例，压力 $p$ 为固定值，抗拉强度 $\sigma_u$ ，壁厚 $t$ 等均符合某种分布，在 $n$ 次模拟中出现 $m$ 次 $Z < 0$ ，得到失效概率 $m/n$ 次，Monte-Carlo法计算流程如图5所示。

2015年之前，管道失效原因占比2/3的是第三方破坏和腐蚀，为了简化分析和综合其它次要失效原因，通常会对获得的基础数据结果乘比例系数3/2。但最近几年公开报道的管道由于焊缝缺陷、地质与自然灾害导致发生事故的原因增加，虽仍占比不大<sup>[22-23]</sup>，但为了保守计算，本研究对基础数据结果乘比例系数2。

表7 CSA Z662 目标可靠度计算结果

Table 7 Calculation results of CSA Z662 target reliability

$\rho$ (人/公顷)	$\rho PD^3$	$R_T$ 对应的公式	$R_T$	$P$
0.04	$4.20 \times 10^8$	$R_T = 1 - \frac{49700}{\rho PD^3}$	0.999 881 528 1	$1.1837 \times 10^{-4}$
3.3	$3.46 \times 10^{10}$	$R_T = 1 - \frac{1.405 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.6}}$	0.999 999 444 4	$5.5558 \times 10^{-7}$
18	$1.89 \times 10^{11}$	$R_T = 1 - \frac{1.405 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.6}}$	0.999 999 963 2	$3.6807 \times 10^{-8}$
100	$1.05 \times 10^{12}$	$R_T = 1 - \frac{1.405 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.6}}$	0.999 999 997 6	$2.3679 \times 10^{-9}$

表8 修正目标可靠度计算结果

Table 8 Correct the calculation results of target reliability

$\rho$ (人/公顷)	$\rho PD^3$	$R_T$ 对应的公式	$R_T$	$P$
0.33	$3.46 \times 10^9$	$R_T = 1 - \frac{9.96}{(\rho PD^3)^{0.59}}$	0.999 976 550 5	$2.3453 \times 10^{-5}$
3.1	$3.25 \times 10^{10}$	$R_T = 1 - \frac{9.3 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.65}}$	0.999 999 579 6	$4.2035 \times 10^{-7}$
6.2	$6.50 \times 10^{10}$	$R_T = 1 - \frac{9.3 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.65}}$	0.999 999 866 1	$1.3394 \times 10^{-7}$
29	$3.04 \times 10^{11}$	$R_T = 1 - \frac{9.3 \times 10^{10}}{(\rho PD^3)^{1.65}}$	0.999 999 989 5	$1.0505 \times 10^{-8}$

根据 ZHOU W 的研究<sup>[24]</sup>, 考虑失效原因的权重, 得到管道 ULS 的总失效概率计算方式:

$$P_{ULS} = \frac{7.5 \times 10^5}{D^3} P_{LL} + P_{RU} \quad (10)$$

式中:  $P_{LL}$  为大泄漏失效概率,  $(\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$ ;  $P_{RU}$  为破裂失效概率,  $(\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$ ;  $P_{ULS}$  为总失效概率,  $(\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$ 。

本设计分别对 19 种壁厚进行了腐蚀和第三方破坏导致管道发生大泄漏、腐蚀导致管道破裂的失效概率

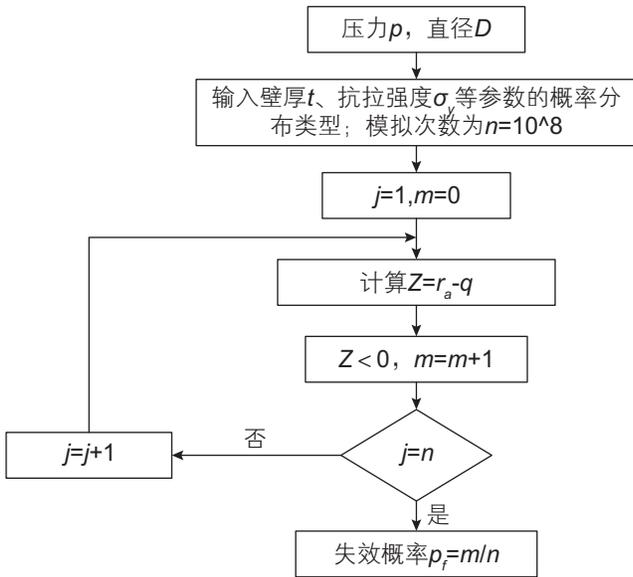


图 5 蒙特卡洛法流程图

Fig. 5 Reliability Design of Natural Gas Pipeline Structure

表 9 总失效概率计算结果

Table 9 Calculation results of total failure probability

壁厚/mm	失效概率	可靠度	壁厚/mm	失效概率	可靠度
7.92	1.3163E-03	0.998 683 653 9	19.05	2.5177E-08	0.999 999 974 8
8.74	1.0605E-03	0.998 939 520 3	20.62	2.2188E-08	0.999 999 977 8
9.53	7.2071E-04	0.999 279 292 2	22.23	2.0286E-08	0.999 999 979 7
10.31	4.0916E-04	0.999 590 839 4	23.83	2.0114E-08	0.999 999 979 9
11.13	1.8917E-04	0.999 810 825 9	25.4	2.0029E-08	0.999 999 980 0
11.91	7.9256E-05	0.999 920 744 1	26.97	2.0000E-08	0.999 999 980 0
12.70	2.9680E-05	0.999 970 319 6	28.58	2.0000E-08	0.999 999 980 0
14.27	3.5429E-06	0.999 996 457 1	30.18	2.0000E-08	0.999 999 980 0
15.88	3.6641E-07	0.999 999 633 6	31.75	2.0000E-08	0.999 999 980 0
17.48	5.2610E-08	0.999 999 947 4	—	—	—

要求。

## 6 结论

中国陆上天然气管道压力大、直径大、钢材等级

进行计算。P03 段管道的总失效概率计算结果见表 9, 总失效概率随壁厚变化趋势见图 6。

从图 6 可以看出:

(1)国内修正的目标可靠度高于原 CSA Z662 标准中的目标可靠度, 国内修正结果更为严格;

(2)综合考虑 P03 段管道所有的失效情况,  $\geq 15.88$  mm 的壁厚能够使得管道的最终极限状态可靠度共同满足 CSA-Z662 和国内修正目标可靠度的

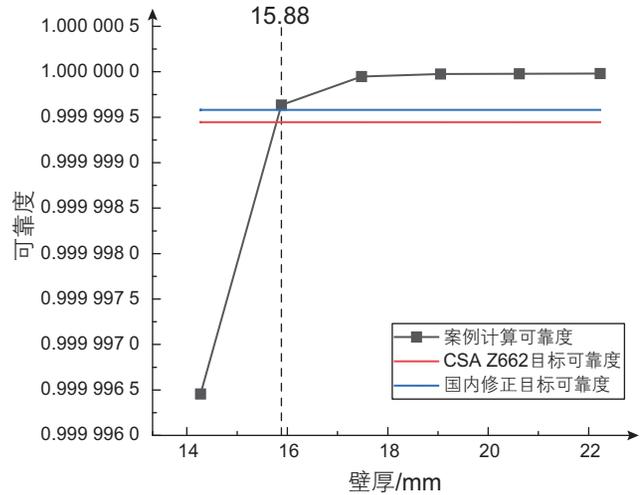


图 6 总失效概率随壁厚变化图

Fig. 6 Diagram of total failure probability versus wall thickness

高, 陆上管道规模庞大, 地形地貌复杂, 气候条件多样。面对各种复杂性, 需要对天然气管道的可靠性进行研究, 以保证天然气供应的安全可靠。

在考虑中国天然气管道情况区别于北美的情况下, 本研究依据 CSA Z662 附录 O, 也借鉴国内研究人员根

据我国国情进行的实际调研以及对 CSA Z662 的改进,适用于国内管道设计。

主要结论:

(1)本研究详细展示了天然气管道可靠性设计中不确定性数据的处理方法,即利用 SPSS 软件初步确定分布类型,绘制 P-P 图进行分布拟合,利用 K-S 检验显著性是否大于 0.05,充分验证数据分布类型。

(2)计算《ASME B36.10-2015 焊接和无缝轧制钢管》标准下与 1016 mm 外径所对应 19 种壁厚的腐蚀导致管道泄漏和破裂、第三方破坏导致大泄漏的可靠度。结果表明,壁厚 $\geq 15.88$  mm 时,P03 段管道能够满足最终极限状态可靠度的要求。且国内修正的目标可靠度相较于 CSA Z662 更为严格,对国内管道设计有一定参考。

## 参考文献

- [1] 杨鹏,余志峰,李程,等.天然气管道可靠性设计方法分析[C]//中国国际管道会议暨第一届中国管道与储罐腐蚀与防护学术交流会,2013.[YANG P, YU Z F, LI C, et al. Research for the reliability based design method of natural gas pipeline[C]// China International Oil & Gas Pipeline Conference, 2013.]
- [2] 贾邦龙.基于可靠性理论的管道壁厚设计[J].石油工业技术监督,2019,35(07):8-12.[JIA B L. Pipe wall thickness design based on reliability theory [J]. Technical supervision of petroleum industry, 2019, 35 (07): 8-12.]
- [3] NESSIM M, ZHOU W, ZHOU J, et al. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(6): 2501-2512.
- [4] 张振永,张金源,余志峰,等.基于可靠性设计与评价方法在天然气管道中的应用[C]//中国国际管道会议暨中国管道与储罐腐蚀与防护学术交流会.2013.[ZHANG Z Y, ZHANG J Y, YU Z F, et al. Reliability based design and assessment of technology in the onshore natural gas pipelines[C]// China International Oil & Gas Pipeline Conference, 2013.]
- [5] 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: 29-40.
- [6] ZHOU J, ROTHWELL B, NESSIM M, et al. Reliability-Based design and assessment standards for onshore natural gas transmission pipelines[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(3): 965-972.
- [7] 周亚薇,张金源,张振永.基于可靠性的小口径天然气管道设计方案优选[J].油气储运,2017,36(09):1071-1077.[ZHOU Y W, ZHANG J Y, ZHANG Z Y. Optimization of reliability-based design schemes on small-diameter natural gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(09): 1071-1077.]
- [8] 赵明,李晴,宋慧琴,等.管线钢管焊接技术的研发现状与发展趋势[J].金属加工(热加工),2022(09):21-25+58.[ZHAO M, LI Q, SONG H Q, et al. Research and development status and development trend of pipeline steel pipe welding technology [J] Metal processing (hot processing), 2022 (09): 21-25+58.]
- [9] 许宁,姜志阳.川气东送 X70 高强度钢级管道材料的国产化应用[J].石油工程建设,2009,35(S1):1-3+14.[XU N, JIANG Z Y. Localization application of X70 high strength steel grade pipeline materials for sichuan east gas transmission [J] Petroleum Engineering Construction, 2009, 35 (S1): 1-3+14.]
- [10] 白路遥,施宁,李亮亮,等.基于蒙特卡洛法的埋地悬空管道结构可靠度分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(05):48-52+59.[BAI L Y, SHI N, LI L L, et al. Reliability analysis of buried suspended pipeline structure based on Monte Carlo method. [J] Journal of Xi'an University of Petroleum (NATURAL SCIENCE EDITION), 2016, 31 (05): 48-52 + 59.]
- [11] 虞维超,黄维和,宫敬,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(02):184-191.[YU W C, HUANG W H, GONG J, et al. Research on reliability evaluation index of natural gas pipeline network system [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4 (02): 184-191.]
- [12] 帅义,帅健,刘朝阳.腐蚀管道可靠性评价方法研究[J].石油科学通报,2017,2(02):288-297.[SHUAI Y, SHUAI J, LIU C Y. Research on reliability evaluation method of corroded pipeline [J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2 (02): 288-297.]
- [13] 马晓磊.天然气管道冲击外载荷作用下的极限状态设计方法研究[D].四川:西南石油大学,2017.[MA X L. Research on limit state design method of natural gas pipeline under impact external load[D]. Sichuan: Southwest Petroleum University, 2017.]
- [14] 华红玲.基于可靠性的天然气管道一级地区强度设计系数研究[D].四川:西南石油大学,2014.[HUA H L. Research on strength design coefficient of natural gas pipeline in the first region based on reliability[D]. Sichuan: Southwest Petroleum University, 2014.]
- [15] 王周伟.SPSS统计分析与综合应用[M].上海:上海交通大学出版社,2012.[WANG Z W. SPSS statistical analysis and comprehensive application [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2012.]
- [16] 江权,崔洁,冯夏庭,等.玄武岩力学参数的随机性统计与概率分布估计[J].岩土力学,2017,38(03):784-792.[JIANG Q, CUI J, FENG X T, et al. Stochastic statistics and probability distribution estimation of mechanical parameters of basalt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(03): 784-792.]

- [17] ZIMMERMAN T J E, COSHAM A, HOPKINS P, et al. Can limit states design be used to design a pipeline above 80% SMYS [C]. //The 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Lisbon, Portugal, July 5–9, 1998. 1998: 9–.
- [18] 张振永, 张文伟, 张金源, 等. 基于可靠性设计方法的长输管道选材方案[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 6. [ZHANG Z Y, ZHANG W W, ZHANG J Y, et al. Material scheme of long-distance pipeline based on the reliability design method [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 6.]
- [19] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline system. CSA Z662–2007[S]. Mississauga: CSA, 2007.
- [20] ZHANG J, ZHANG Z, YU Z, et al. Building a target reliability adaptive to china onshore natural gas pipeline[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [21] 冯晓波, 杨桦. 用 MATLAB 实现蒙特卡罗法计算结构可靠度[J]. 中国农村水利水电, 2002(08): 50–51. [FENG X B, YANG H. Calculation of structural reliability by Monte Carlo method with MATLAB [J]. China Rural Water Conservancy and hydropower, 2002 (08): 50–51.]
- [22] 范壮. 基于随机森林算法的油气管道风险判定方法研究[D]. 中国地质大学(北京), 2021. [FAN Z. Research on risk judgment method of oil and gas pipeline based on stochastic forest algorithm [D] China University of Geosciences (Beijing), 2021.]
- [23] 陈雪峰. 天然气长输管道定量风险评估方法及其应用研究[D]. 北京科技大学, 2020. [CHEN X F. Quantitative risk assessment method for long distance natural gas pipeline and its application [D] Beijing University of Science and Technology, 2020.]
- [24] NESSIM M, ZHOU W X. Guidelines for reliability-based design and assessment of onshore natural gas pipelines[M]. Virginia: Pipeline Research Council International, 2009.

(编辑 马桂霞)