

# 基于可靠性的天然气管道设计系数研究

王立航 孙萍萍 吴志遥 郭 昱 王秋妍

长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100

**摘 要:**为研究在设计系数 0.8 下管道运行的安全性,对目前西气东输工程中使用最多的 X 80 管道建立极限状态方程,采用 Monte-Carlo 法对管道进行可靠性分析,并根据 API 579《Fitness-For-Service》规定的目标可靠度来确定管道的极限输气压力并推算出设计系数。结果表明,当压力的变异系数为 0.1 时,只是将设计系数提高到 0.8,管道运行的可靠度小于目标可靠度 0.99;如果能减缓管道在输气期间的压力波动,当压力的变异系数减小为 0.08 时,可靠度才能达到目标可靠度规定的取值,管道能安全运行。最后计算出不同压力的变异系数下的设计系数,为以后的研究提供依据。

**关键词:**设计系数;极限状态方程;可靠性理论;Monte-Carlo 法;目标可靠度

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.03.003

## 0 前言

天然气作为能源和化工原料,对经济可持续发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。近十年是管道建设的高峰期<sup>[2]</sup>,对已建和正建的输气管道,在不影响安全运行的前提下,实现最大限度减小管道的建设成本以及提高管道的输送效率有两种方法:一是提高输气管道的设计系数,即减小管道运行的安全余量,最大限度发挥管道的工作能力;二是采用新型高钢级大口径管道<sup>[3]</sup>。随着中国钢管制造工艺的不断发展,西气东输一线、二线、三线等重要天然气管道工程上已经大量运用了 X 70、X 80 等高钢级管线钢管<sup>[4]</sup>。所以对已建的输气管道,提高设计系数是最可行的方法,因此研究管道设计系数具有重要的理论意义和工程应用价值,也是国内外专家学者一直研究的重要课题。加拿大于 20 世纪 70 年代就将设计系数 0.8 引入了管道设计规范;美国于 20 世纪 90 年代将一级地区的设计系数提高到了 0.8 并且在许多大型管道工程设计中已采用;根据 GB 50251-2015《输气管道设计规范》,2015 年中国将不经常有人活动及无永久性人员居住的一类一级地区的设计系数提高到了 0.8。中国研究人员

做了大量的实验和理论研究来证明将设计系数提高到 0.8 的可能性<sup>[5-7]</sup>,主要采用的方法是 100 % SMYS 管道水压试验;中国以外的国际学者则大多根据可靠性的分析方法来研究设计系数<sup>[8-10]</sup>,由于管道材料、运行压力以及其他参数的不确定性,采用可靠性的分析方法更合理。本研究针对目前西气东输使用最广的 X 80 管道建立极限状态方程,采用 Monte-Carlo 法对管道进行可靠性分析,并根据 API 579《Fitness-For-Service》规定的目标可靠度来确定管道的极限输气压力,从而得到设计系数可取的最大值。

## 1 可靠度计算原理

在管道运行过程中,受上下游供需量变化和停输再启动的影响,运行压力存在一定的波动;管材的力学性能不可能保持在某一特定数值,而是呈现出某种分散性;受检测工具精度影响,缺陷尺寸的表述值与实际值存在偏差。管道的运行压力、材料性能以及检测结果均存在不确定性<sup>[11]</sup>。

引入可靠性原理目的是处理这些评价参数的不确定

收稿日期:2015-12-01

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目“提高输气管道设计系数的理论研究”(Q 20151309)

作者简介:王立航(1992-),男,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向为油气管道可靠性和安全分析。

定性,提高评价结果的精确性。在可靠度计算中,主要是得到管道运行时的安全水平,通常用“可靠度”或者“失效概率”来表示。在基于可靠性的计算方法中,要考虑两方面问题,首先推导或假设随机变量的概率分布,提出功能函数,进行可靠性分析;其次是给定目标安全性水平,并用可以接受的判据检验<sup>[12]</sup>。

### 1.1 极限状态方程

影响管道可靠度的随机变量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,则功能函数为:

$$Z = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

当 $Z > 0$ 时,管道处于安全状态; $Z = 0$ 时,管道处于极限状态; $Z < 0$ 时,管道则为失效状态。采用管道屈服的极限状态方程为:

$$Z = 2\sigma_y t - pD \quad (2)$$

式中: $\sigma_y$ 为管道屈服强度,MPa; $t$ 为管道壁厚,mm; $D$ 为管道外径,mm; $p$ 为操作压力,MPa。

分析管道的可靠度,首先要计算出管道的失效概率,即得到功能函数 $Z < 0$ 的概率 $p_f$ ,根据可靠性理论管道失效概率的表达式为:

$$p_f = \int_{-\infty}^0 f_z(Z) dZ = f(\sigma_y, t, p, D) \quad (3)$$

得到管道的可靠度 $p_r$ :

$$p_r = 1 - p_f \quad (4)$$

由于计算的复杂性,工程一般不采用式(3)直接计算,大多采用近似的方法如一次二阶矩法、Monte-Carlo法等。为了计算结果更加接近真实值,采用 Monte-Carlo 法来计算管道的失效概率和可靠度。

### 1.2 基于 Monte-Carlo 法的可靠度计算

Monte-Carlo 法是一种随机模拟方法,又称随机抽样技术或统计方法,其根本思想基于大数定律和中心极限定理。基本原理:根据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的分布形式产生一组相应的随机数,将其带入极限状态函数 $Z = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中,循环 $n$ 次,当 $n$ 足够大,根据大数定律,频率已接近概率,即得出失效概率。对于输气管道

Monte-Carlo 计算可靠度操作流程见图1,取值的数量大多在 Matlab-Carlo 程序中通过编程实现可靠度的计算,每个压力点模拟的次数为 $10^6$ 次,模拟次数越多越能增加结果的可靠性。

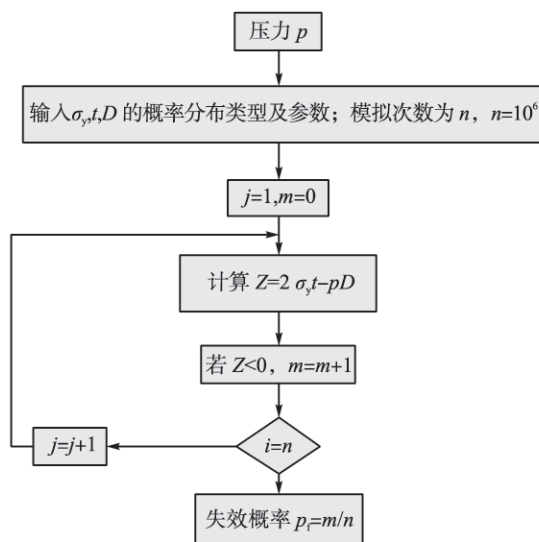


图1 Monte-Carlo 法计算可靠度操作流程

## 2 基本参数

### 2.1 管道目标可靠度的确定

国际上对管道目标可靠度的分析主要有基于可靠性理论的计算方法和基于历史数据的分析预测方法两种。对应上述两种管道目标可靠度分析方法,国际上提出了两种不同形式的管道目标可靠度,见表1<sup>[13-16]</sup>。本文在分析西气东输管道目标可靠度时采用了基于可靠性理论的分析方法。为此,借鉴 API 579《Fitness-For-Service》提出管道目标可靠度,并以一类地区对应低风险,二类地区对应中风险,三、四类地区对应高风险。

### 2.2 管道参数

以西气东输工程中使用最广泛的管道 X 80 为例,经过统计,管道参数均服从正态分布,具体参数见表2,管道在运行时的压力平均值为 9.16 MPa,压力标准差为 0.916 MPa<sup>[17]</sup>。

表1 管道目标可靠度

| 组织和机构                           | 目标可靠度(最大失效概率)                           |                                                         |                                                         | 可靠度分析方法     | 适用范围             |
|---------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|------------------|
|                                 | 低风险                                     | 中风险                                                     | 高风险                                                     |             |                  |
| API(API 579)                    | 0.99(10 <sup>-2</sup> )                 | 0.999(10 <sup>-3</sup> )                                | 0.999 99(10 <sup>-5</sup> )                             | 基于可靠性理论     | 油气输送管道,压力容器及炼化装备 |
| DNV(DNV RP-F 101, DNV OS-F 101) | 0.999(10 <sup>-3</sup> )                | 0.999 9(10 <sup>-4</sup> )                              | 0.999 99(10 <sup>-5</sup> )                             | 基于可靠性理论     | 油气输送管道           |
| 加拿大 C-FER                       | 1次/(10 <sup>6</sup> m·a <sup>-1</sup> ) | 10 <sup>-1</sup> 次/(10 <sup>6</sup> m·a <sup>-1</sup> ) | 10 <sup>-4</sup> 次/(10 <sup>6</sup> m·a <sup>-1</sup> ) | 基于历史数据的分析预测 | 油气输送管道           |

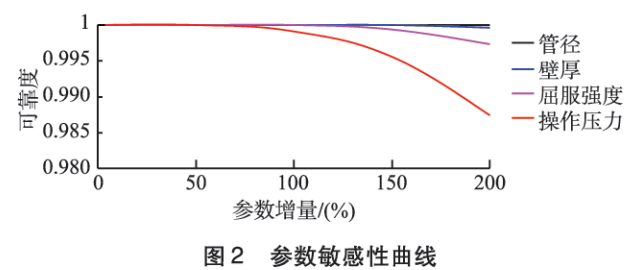
表 2 管道参数

| 钢级   | 规格             | 管径均值 / mm | 管径标准差 / mm | 壁厚均值 / mm | 壁厚标准差 / mm | 屈服强度均值 /MPa | 屈服强度标准差 /MPa |
|------|----------------|-----------|------------|-----------|------------|-------------|--------------|
| X 80 | Φ1 219 × 18. 4 | 1 219     | 1. 33      | 18. 86    | 0. 46      | 620         | 27. 6        |

3 管道可靠度分析

3.1 参数敏感性分析

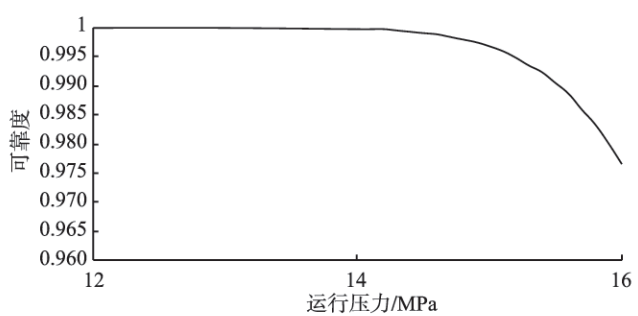
根据式(2),影响管道可靠度的主要因素有屈服强度、壁厚、管径和操作压力<sup>[18-19]</sup>。以表 2 的参数为基础值,分别在屈服强度、壁厚、管径和操作压力 4 个不确定参数的初始变准差上每次增加 50 % 后作为新的数据<sup>[20]</sup>。每个参数增加 4 次,每次模拟次数为 10<sup>6</sup> 次。参数敏感性曲线见图 2。



由图 2 分析可知,对管道可靠度影响最大的因素是操作压力,其次是屈服强度,管径和壁厚标准差的变化对可靠度基本没有影响。所以主要研究对象是运行时的操作压力。

3.2 可靠度计算

管道在运行过程中,其承压随输送气量的变化而波动。统计结果显示,我国在役长距离输气管道压力基本满足正态分布规律,变异系数为 0. 1,采用 Monte-Carlo 法计算管道的可靠度结果见图 3。

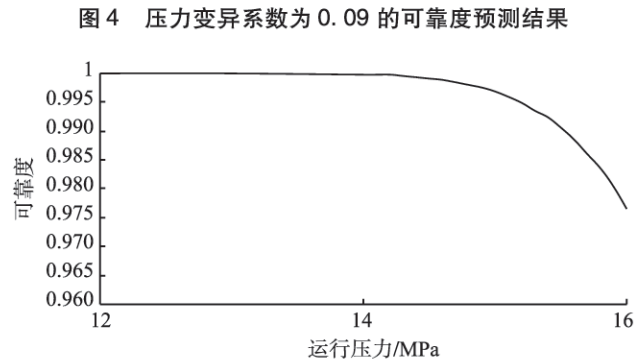
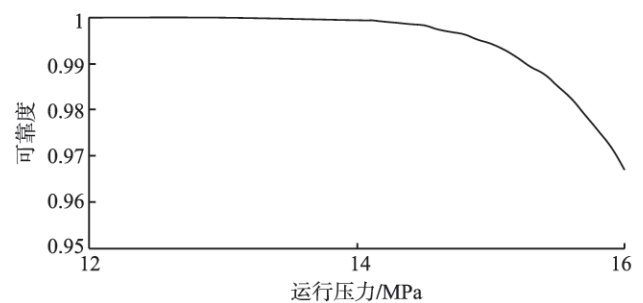


根据 GB 50251 - 2015《输气管道设计规范》,取该地区设计系数为 0. 8,得到管道操作压力的计算公式为:

$$p = \frac{2\sigma_y Ft}{D} \tag{5}$$

式中: $p$  为设计压力,MPa; $t$  为管道壁厚,mm; $D$  为管道外径,mm; $F$  为强度设计系数。

将管道的相关参数带入式(5),计算得到管道的最大操作压力为 15. 34 MPa,对应图 3 的可靠度为 0. 983 2,小于 API 579《Fitness-For-Service》所给出的目标可靠度 0. 99,所以使用设计系数 0. 8 计算得到的操作压力来输送天然气无法达到安全标准。由上文可知,对管道可靠度影响最大的参数为操作压力,为了保证在 15. 34 MPa 下管道能安全运行,最可行的方法就是提高天然气输送的稳定性,即降低压力变异系数。将压力变异系数取为 0. 09 和 0. 08 带入程序,管道可靠度的计算结果见图 4 ~ 5。



由图 4 可知,当最大操作压力为 15. 34 MPa,变异系数为 0. 09 时,可靠度为 0. 988 1,不能满足低风险地区规定的目标可靠度 0. 99,无法达到安全输送的标准;由图 5 可知,当降低变异系数到 0. 08 后,在 15. 34 MPa 的操作压力下,可靠度为 0. 991 1,满足 API 579《Fitness-For-Service》规定的目标可靠度。对于该地区正在服役的管道,如果只是简单地提高设计系数到 0. 8,以此来提高输气压力将会有很大的安全隐患,通过计算结果可知,最可行的方法是降低压力波动,所以当有输气站将要暂停运输时,可以提前减缓输气速率再停运,尽可能地减小停输时的压力波动才能满足标准。

3.3 设计系数反算

由式(3)变化可得:



$$F = \frac{pD}{2\sigma_y t} \quad (6)$$

管道设计系数的研究一直是国内外的重要课题,以0.99为目标可靠度,将操作压力带入式(6)计算在不同压力变异系数下的设计系数,结果见表3。

表3 设计系数计算结果

| 可靠度  | 压力变异系数 | 极限操作压力 /MPa | 设计系数  |
|------|--------|-------------|-------|
| 0.99 | 0.10   | 15.03       | 0.783 |
| 0.99 | 0.09   | 15.28       | 0.796 |
| 0.99 | 0.08   | 15.51       | 0.808 |
| 0.99 | 0.07   | 15.72       | 0.819 |

目前我国已将设计系数0.8列入了相关的标准中,随着天然气行业的发展,设计系数可能会继续提升。根据表3可知,提高设计系数最有效的方法就是提高压力变异系数,即最大限度地减缓输送过程中的压力波动,对于已建管道今后需要研究降低压力波动的方法来进一步提高管道设计系数。

#### 4 结论

对目前西气东输工程中使用最多的X80管道建立了极限状态方程,采用Monte-Carlo法对管道进行了可靠性分析,并以API 579《Fitness-For-Service》提出的管道目标可靠度作为评价依据。通过对参数敏感性分析可知,对管道可靠度影响最大的参数是操作压力,屈服强度、壁厚和管径对管道可靠度几乎没有影响。以0.8为设计系数计算出的压力为运行压力时,只有将压力变异系数降低至0.08时才能满足安全运行要求。以0.99为目标可靠度,反算出不同压力变异系数下的设计系数,为今后设计系数研究提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 吴瑛瑛. 大数据在管道运行中的应用探讨[J]. 天然气与石油, 2015, 33(3): 15-17.  
Wu Xiyang. Application of Big Data in Pipeline Operation [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(3): 15-17.
- [2] 高明野, 王震, 范天晓. 清洁能源天然气市场现状及分析[J]. 天然气与石油, 2015, 33(1): 36-39.  
Gao Mingye, Wang Zhen, Fan Tianxiao. Present Situation of Domestic Natural Gas Market and Its Analysis [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(1): 36-39.
- [3] 赵新伟, 张广利, 罗金恒, 等. 提高设计系数对天然气管道安全可靠性影响及可行性分析[C]//中国机械工程学会压力容器分会、合肥通用机械研究院, 压力容器先进技术——第七届全国压力容器学术会议论文集. 无锡: 中国机械工程学会压力容器分会, 合肥通用机械研究院, 2009: 465-470.
- [4] Zhao Xinwei, Zhang Guangli, Luo Jinheng, et al. Impact of Improving Design Factor over 0.72 On the Safety and Reliability of Gas Pipelines and Feasibility Justification [C]//Pressure Vessel Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, Hefei General Machinery Research Institute. Pressure Vessel Advanced Technology-The Seventh National Symposium on Pressure Vessel. Wuxi: Pressure Vessel Branch of China Mechanical Engineering Society, Hefei General Machinery Research Institute, 2009: 465-470.
- [4] 王晓香, 李延丰. 高强度管线钢管开发在中国的新进展[J]. 钢管, 2011, 40(1): 12-18.  
Wang Xiaoxiang, Li Yanfeng. Recent Progress of Domestic R & D of Hi-Strength Steel Linepipe Technology [J]. Steel Pipe, 2011, 40(1): 12-18.
- [5] 赵新伟, 罗金恒, 张广利, 等. 0.8设计系数下天然气管道用焊管关键性能指标[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 355-359.  
Zhao Xinwei, Luo Jinheng, Zhang Guangli, et al. Key Performance Indicators of Welded Pipe for Natural Gas Pipeline with Design Factor of 0.8 [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(4): 355-359.
- [6] 吴宏, 罗金恒, 张对红. 西气东输三线0.8设计系数试验段水压试压方法及其应用[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 102-107.  
Wu Hong, Luo Jinheng, Zhang Duihong. Hydrostatic Testing Pressure Determination of the Test Pipe Section with a 0.8 Design Factor in the West-to-East China Gas Pipeline III [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 102-107.
- [7] 向波, 湛贵宇, 向熠星, 等. 西三线一级地区设计系数的选择[J]. 天然气与石油, 2011, 29(5): 1-5.  
Xiang Bo, Shen Guiyu, Xiang Yixing, et al. Selection of Design Coefficient of Pipeline Segment Passing Through Grade I Area of West-to-East Gas Pipeline III [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(5): 1-5.
- [8] Bisaggio H D C, Netto T A. Predictive Analyses of the Integrity of Corroded Pipelines Based on Concepts of Structural Reliability and Bayesian Inference [J]. Marine Structures, 2015, 41: 180-199.
- [9] Valle-Molina C, Alamilla J L, Sánchez-Moreno J, et al. Reliability Functions for Buried Submarine Pipelines in Clay Subjected to Upheaval Buckling [J]. Applied Ocean Research, 2014, 48: 308-321.
- [10] McLamb M, Hopkins P, Marley M, et al. A Justification for Designing and Operating Pipelines up to Stresses of 80% SMYS [C]//ASME. Proceedings of 2002 4<sup>th</sup> International Pipeline Conference. New York: ASME, 2002: 745-757.

(下转第19页)



(上接第 14 页)

- [11] 鞠成科, 黄刚, 乔贵民, 等. 海底管道腐蚀失效概率定量计算方法研究[J]. 物流技术, 2014, 33(13): 146-149.  
Ju Chenke, Huan Gang, Qiao Guimin, et al. Study on Quantitative Measurement of Corrosion and Failure Probability of Seafloor Pipelines [J]. Logistics Technology, 2014, 33(13): 146-149.
- [12] 帅健. 油气管道可靠性的极限状态设计方法[J]. 石油规划设计, 2002, 13(1): 18-21.  
Shuai Jian. The Reliability-Based Limit-State Design Method [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2002, 13(1): 18-21.
- [13] 罗金恒, 赵新伟, 韩晓毅, 等. 西气东输管道可靠度预评估[J]. 焊管, 2005, 28(3): 62-65.  
Luo Jinheng, Zhao Xinwei, Han Xiaoyi, et al. Pre Evaluation on Reliability of West-East Gas Transmission Pipeline [J]. Welded Pipe and Tube, 2005, 28(3): 62-65.
- [14] British Standards Institution. BSI PD 6493 - 1991 Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures [S]. London: British Standards Institution, 1991.
- [15] Milne I, Ainsworth R A, Dowling A R, et al. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects: Central Electricity Generating Board Report [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1988, 32(2): 103-104.
- [16] British Standards Institution. BSI PD 6493 - 1991 Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures [S]. London: British Standards Institution, 1991.
- [17] 张宏, 顾晓婷, 赵丽恒. 基于可靠性的油气管道设计系数研究[J]. 焊管, 2011, 34(4): 58-62.  
Zhang Hong, Gu Xiaoting, Zhao Liheng. Research on Design Coefficient of Oil and Gas Pipeline Based on Reliability [J]. Welded Pipe and Tube, 2011, 34(4): 58-62.
- [18] 沙晓东, 陈晓辉, 黄坤, 等. 输气管道应力影响因素分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(1): 1-4.  
Sha Xiaodong, Chen Xiaohui, Huang Kun, et al. Analysis on Factors Affecting Stress in Gas Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2013(1): 1-4.
- [19] 蔡良君. 基于模糊层次分析法的管道风险因素权重分析[J]. 天然气与石油, 2010, 28(2): 1-3.  
Cai Liangjun. Weight Analysis on Pipeline Risk Factor Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(2): 1-3.
- [20] 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 Kai, Zhang Wenwei, Gong Jing, et al. Computation of Gas Pipeline Reliability [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(7): 729-733.