

文章编号: 1000-8241(2014)07-0729-05

天然气管道可靠性的计算方法

温凯^{1,2} 张文伟² 宫敬¹ 李恒东² 张振永² 赵博渊¹

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. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊 065000

摘要: 基于可靠性的设计和评价方法(RBDA)是天然气管道设计技术的发展方向, 国内外学术界针对该方法的应用展开广泛研究。针对天然气管道基于可靠性设计与评价方法所涉及的理论内容, 研究了管道可靠性的分析过程, 给出了极限状态方程蒙特卡罗仿真的通用算法, 建立了管道可靠度计算软件框架, 并以 CSA Z662 附录 O 中提供的无缺陷管道屈服和破裂极限状态函数为例对某输气管道进行可靠度计算和参数的敏感性分析。最后, 根据分析结果, 对管道的设计和管理提出可行性建议。提出的计算方法将方程与仿真计算分离, 适合将更多的方程列入计算框架中, 可以对管道的可靠性进行全面分析。(图 5, 表 1, 参 17)

关键词: 天然气管道; 可靠性分析; 极限状态方程; 蒙特卡罗仿真; 软件框架

中图分类号: TE53

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.07.009

Computation of gas pipeline reliability

WEN Kai^{1,2}, ZHANG Wenwei², GONG Jing¹, LI Hengdong², ZHANG Zhenyong², ZHAO Boyuan¹

1. National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang, Hebei, 065000

Abstract: The reliability-based design and assessment (RBDA) method is the prospect of natural gas pipeline design. It is studied intensively by domestic and overseas academic communities. According to the theory involved in RBDA, analysis procedure of pipeline reliability is investigated, universal algorithm of limit state equation of Monte-Carol simulation is provided, and the calculation software framework for pipeline reliability is established. Taking the yield and fracture limit state function of zero defect pipe provided in Appendix O of CSA Z662 as an example, calculation of reliability and sensitivity analysis of parameters of an actual gas pipeline are implemented. Finally, based on the analysis results, feasible suggestions for the pipeline design and management are proposed. The computational method proposed separates the equation and simulation calculation, which is suitable to list more equations in the computing framework, so that a comprehensive analysis can be made for pipeline reliability. (5 Figures, 1 Table, 17 References)

Key words: gas pipeline, reliability analysis, limit state equation, Monte-Carol simulation, software framework

为确保天然气供应量满足未来国民经济的发展需要, 高压大流量长距离输送成为我国天然气管道发展的必然趋势。由管道设计准则可知, 管道工程的大直径、高压输送这一目标可以通过增加钢管壁厚和钢管强度来实现, 而提高管线钢的强度是增加管道输量的有效方式^[1]。西气东输二线是目前全世界最大的 X80 钢级管道项目, X80 钢级钢管国产化率超过了 90%, 超高强度管线钢管在中国的开发大大缩小了我国在该领域与西方先进国家的差距^[2]。根据中国石油的发展规划, 为了进一步提高输送效率和降低建设成本, 管道

建设已将目光投向 X90/X100 等超高强度管线钢。

与材料科学和施工技术的快速发展相比, 管道设计方法采用基于应力的设计方法, 将材料、制造、施工、运行等方面的不确定性集中在统一的安全系数中, 即设计系数, 局限性显著, 如不能反映管材性能水平, 其有效性无法证实和量化; 不能综合考虑管道设计、建设、运行和维护整体性; 无法适应新的服役环境, 如地震、冻土、滑坡等地段设计; 超出经验范围的新材料的使用无法评定等。这些事实使人们普遍意识到在某些情况下根据传统的设计方法确定的安全性水平的裕量

过大,因此,转向研究设计参数的不确定性对管道运行安全可靠性的影响,并逐步提出了基于可靠性的管道设计方法和标准,以弥补理论上的滞后^[3]。基于可靠性的设计和评价方法的优点明显,已经应用于航空航天、汽车、电子等行业^[4-6]。2006年,国际标准化组织(ISO)发布了标准 ISO 16708-2006《石油天然气工业管道输送系统——基于可靠性的极限状态方法》,提出了基于可靠性的管道设计方法^[7]。2007年,加拿大标准协会发布了标准 CSZ Z662-2007《油气管道系统》,将陆上天然气输送管道的基于可靠性的设计与评价方法作为附件 O 列入标准^[8]。

针对特定的极限状态方程,国内外学者分别给出各自的研究成果。帅健^[9]将影响管道剩余寿命的各种因素看成是分布各异的随机变量,建立了预测管道失效的概率模型,并利用该模型研究了腐蚀速率、缺陷深度、管道壁厚和工作压力等因素对管道可靠性的影响;方华灿等^[10]利用可靠性方法,建立了海底管道抗腐蚀评估的可靠性分析模型,给出了描述检测误差、计算误差及环境载荷的概率分布;Zhou W 等^[11]对于腐蚀缺陷管道的破裂极限状态方程中的模型系数进行了深入研究,通过大量实验数据的收集和整理建立了模型系数的数据库,并分析了 B31G、B31G 修订版, DNV, PCORRC 和 RSTRENG 这 5 种典型腐蚀管道破裂极限状态方程同模型系数的关联度;Pandey M D^[12]利用可靠性方法及极限状态方程对管道检测和维修计划对于管道可靠性的影响进行分析,给出了满足管道目标可靠度的最优检测周期和维修策略。

以上研究均局限于针对管道某一具体失效因素进行计算分析。基于此,针对天然气管道基于可靠性设计与评价方法所涉及的理论内容,给出管道可靠性计算的统一算法,建立管道可靠度的计算框架,并在此基础上,全面分析管道各因素的可靠性,最终得到管道可靠性的全面评价结果。

1 基于可靠性的设计与评价方法

基于可靠性的设计与评价方法(RBDA 方法)的本质是将极限状态方程在概率意义下计算得到的可靠性作为安全性的度量。而管道的可靠性被定义为一定长度(通常选 1 km)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。可靠性 R 与相同

时段内的失效概率(P_f)之间的关系为:

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

式中: P_f 由载荷与抗力的概率分布计算得到。

在可靠性理论中,对于确定的极限状态,其抗力和载荷不再被视为定值,而是被视为服从一定概率分布的随机变量,其具有一定的离散性,强度和应力的离散性使应力、强度概率分布曲线在一定条件下可能相交,两条概率曲线的重叠部分,称为干涉区(图 1),即管道可能出现的失效区域。

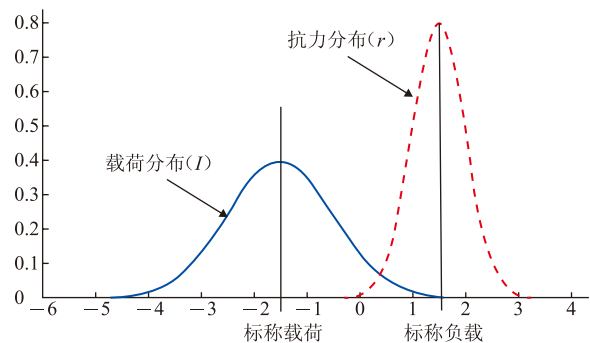


图 1 载荷效应与抗力分布示意图

其功能函数表示为:

$$g(x)=r-l \quad (2)$$

失效概率计算式为:

$$P_f=P[g(x)<0]=P(R-L<0) \quad (3)$$

通过数据的统计分析,可以建立抗力 r 和载荷 l 的分布函数。设载荷 l 为连续的随机变量,概率密度函数为 $f_l(l)$;抗力 r 也为连续随机变量,概率密度函数为 $f_r(r)$ 。于是:

$$P_f=\int_0^{\infty} f_l(l) \left[\int_0^l f_r(r) dr \right] dl \quad (4)$$

2 极限状态方程

管道中涉及的极限状态方程众多,基于可靠性的设计和评价方法的研究成果已经写入标准 CSA Z662-2007 的附录 O 中作为管道设计和评价的准则之一^[8]。因此,采用该标准中的管道极限状态方程编制失效概率计算软件。

钢管焊接完毕后进行超声波检测或 X 光工业电视检查,质量符合石油行业标准,钢管不存在影响管道使用功能的缺陷,可视为无缺陷管道。经过对各国管道运行事故数据分析,管道的材料和施工是比较重要的失效因素,次环节中造成缺陷主要包括钢管生产过程中、运输过程中和组装焊接中造成的缺陷。因此,研

究无缺陷钢管屈服和破裂的失效概率很有必要。

无缺陷管道屈服的极限状态方程为:

$$g_1 = 2\sigma_y t - pD \quad (5)$$

式中: g_1 为无缺陷管道屈服状态的安全裕度; t 为管道壁厚; D 为管道直径; σ_y 为屈服压力; p 为管道运行压力。

无缺陷管道破裂的极限状态方程为:

$$g_2 = 2b\sigma_{flow} t - pD \quad (6)$$

式中: g_2 为无缺陷管道破裂的安全裕度; b 为模型误差因子; σ_{flow} 为流变应力。

如果将流变应力定义为 $0.953\sigma_y$, 则式(6)可转化为:

$$g_2 = 1.906b\sigma_y t - pD \quad (7)$$

依据文献[8]的附录O可知,参数***b***取均值1.0、变异系数4%的正态分布。

3 算法与程序

基于可靠性的设计和评价方法算法的核心在于极限状态方程的计算,可以通过多种方法完成,其中包括一阶和二阶可靠性方法^[13]以及各种模拟方法,如蒙特卡洛方法、重要性抽样方法和拉丁超立方抽样方法^[14]。如若全面考虑管道的可靠性,计算中需要考虑多个极限状态方程,管道可靠度的计算在不同情况下需要考虑的极限状态不同,每个方程涉及众多参数,其中大部分参数又是服从一定概率分布的随机变量。并且针对不同情况,极限状态方程还在不断更新,从而对算法的自适应性和可扩充性提出了严格要求。

因此,采用计算结果更加准确的蒙特卡洛模拟进行管道可靠度分析,可以回避管道可靠度分析中的数学困难,不考虑功能函数的复杂性,且其收敛速度与随机变量的维数无关,极限状态函数的复杂程度与模拟过程无关,更无需将状态函数线性化和随机变量“当量正态”化,具有直接解决问题的能力。

蒙特卡罗方法的基本步骤^[15-17]:

(1)构造概率模型。对于问题本身就具有随机性质的问题,描述和模拟其概率过程;对于本来不具有随机性质的确定性问题,需要构造概率模型。同时根据模型特点和计算需要,对模型进行校正,尽量简化方程,提高计算效率。

(2)实现已知概率分布的抽样。为实现模拟,必须

建立产生伪随机数的方法,进行随机变量的抽样。

(3)建立各种统计量的估计。作为问题的解,可能是概率或期望。对于概率,用频率代替;对于期望,用样本平均值代替。

天然气管道基于可靠性的设计和评价方法算法流程(图2)为:通过识别管道可能的极限状态,建立对应的极限状态方程和评价准则,从而计算出管道的失效概率,给出管道的风险评价,分析其安全可靠性及经济性。图2给出了在特定管段实现RBDA方法所包含的步骤及所需的主要输入,图中所列过程适用于基础参数的录入与提取、失效原因及极限状态方程的选定,两种类型(时间相关、时间无关)极限状态方程的计算及检测修正等防护计划等的实施。

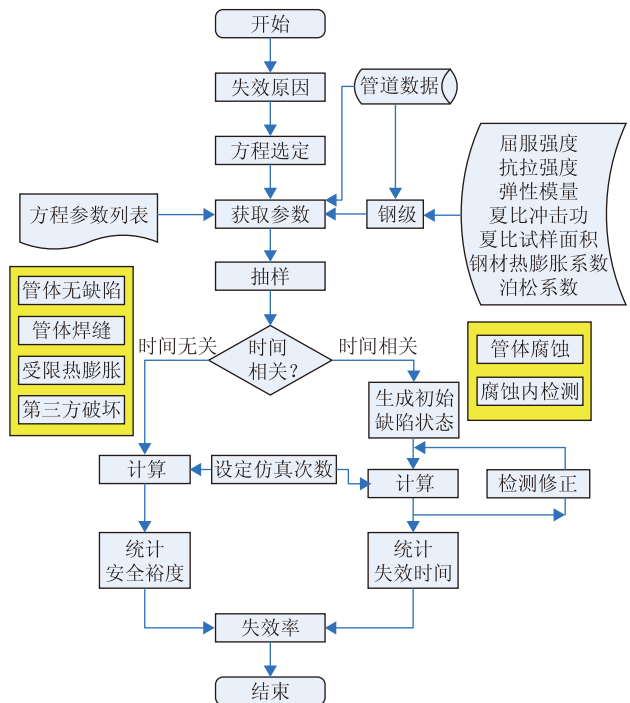


图2 天然气管道基于可靠性的设计和评价方法算法流程图

每一极限状态函数中所用的不确定性参数(也称基本随机变量),必须使用适当的概率模型予以描述。这些模型可在统计数据、理论模型或工程学评价的基础上予以定义。对管段所适用的失效原因和极限状态,需要结合工程实际情况,按照一定的原则进行确定性和概率性筛查检验,从而避免在非主控因素上耗费大量计算。针对管道中的腐蚀缺陷,在线检测等工具的使用可以从一定程度上提高可靠性。对于确定的极限状态,采用蒙特卡罗方法依据基础变量的概率模型及确定性极限状态函数计算其可靠性,最终采用JAVA语言编写可靠度计算程序(图3)。

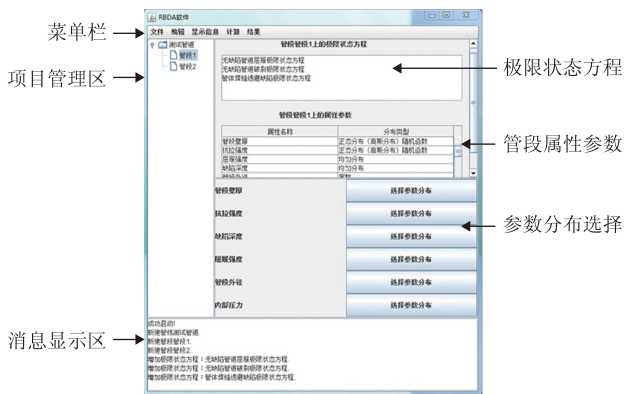


图3 天然气管道可靠度计算程序界面

4 算例分析

以某输气管道作为研究对象(表1),对屈服极限状态和破裂极限状态进行模拟计算。

表1 某实际输气管道基本参数

管径/mm	MAOP/MPa	屈服应力/MPa	壁厚/mm
762	6.9	358	9.1

4.1 屈服极限状态

针对无缺陷管道的屈服极限状态,管道不确定参数包括管道壁厚、屈服强度和工作压力,假设参数均为正态分布,共取13组参数,其中以第一组数据为基准数据,分别在管道壁厚、屈服强度、工作压力3个不确定参数的初始方差上每次增加50%后作为新的数据。每个不确定参数增加4次,共12组新数据。为保证计算结果的准确性,取设定仿真次数 1000×10^4 次。

取3次计算的平均值进行比较分析(图4):管道壁厚、屈服强度、工作压力对于结果的影响程度并不相同,其中对结果影响最大的是工作压力,最小的是管道壁厚。为此,在管道运行中尽量减少运行压力的波动,可以有效减小无缺陷管道屈服的失效概率。

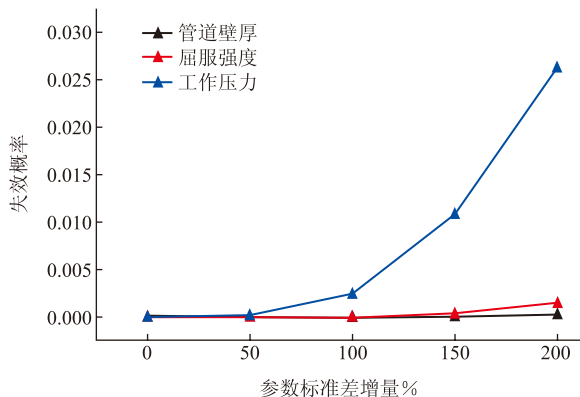


图4 屈服极限状态下参数变化对失效概率的影响曲线

4.2 破裂极限状态

针对无缺陷管道的破裂极限状态,管道不确定参数包括管道壁厚、屈服强度、工作压力和模型系数,假设参数均为正态分布,由于增加了模型系数这一不确定参数,共取17组参数。其中以第1组数据为基准数据,在管道壁厚、屈服强度、工作压力和模型系数4个不确定参数的初始方差上每次增加50%后作为新的数据,每个不确定参数增加4次,共16组新数据,仿真次数也为 1000×10^4 次。

取3次计算的平均数进行比较分析(图5):管道壁厚、屈服强度、工作压力和模型系数对于结果的影响程度并不相同,依次是工作压力、模型系数、屈服强度、管道壁厚。

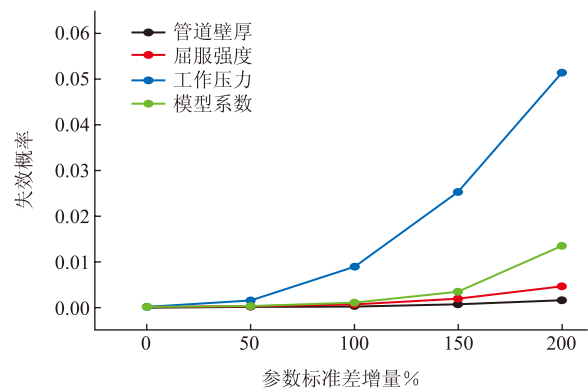


图5 破裂极限状态下参数变化对失效概率的影响曲线

综上所述,无缺陷管道屈服极限状态的参数敏感性从高到低依次为管道壁厚、屈服强度和工作压力;无缺陷管道破裂极限状态的参数敏感性从高到低依次为管道壁厚、屈服强度、工作压力和模型系数。其中敏感性最高的是管道壁厚。

5 结论

RBDA方法的实质是将可靠性用作天然气管道安全性的衡量标准。相对于传统的许用应力法, RBDA方法针对管道的实际失效形式进行设计,避免采用不合理或过于保守的设计标准。RBDA方法涉及管道的设计与运行,有助于实现总体风险的一致性,消除了许用应力法设计裕量过于保守的缺点,进而在满足安全要求的前提下优化管道建设与运行。RBDA方法能够有针对性地采取措施,避免功能冗余或不足,即以最小的成本达到既定的安全目标,可以节省投资。同时, RBDA方法适用于解决新的问题,如高强度管材的应

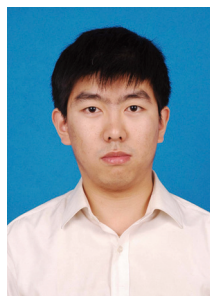
用、设计系数的提高、新的环境条件等。

我国管道技术已经达到世界领先水平,相应的设计方法需要与之匹配,采用基于可靠性的极限状态设计方法是一个发展趋势。基于可靠性的设计方法可最大限度地降低管道的工程建设成本,并保障管道的安全可靠。

参考文献:

- [1] 余志峰,张文伟,张志宏,等.我国天然气输送管道发展方向及相关技术问题[J].油气储运,2012,31(5):321-325.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册第20册可靠性、维修性设计[M].北京:航空工业出版社,1999.
- [5] 苏德清,廖炯生,何国伟,等. GJB 813-1990 可靠性模型的建立和可靠性预计[S].北京:国防科学技术工业委员会,1990.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7826-1987 系统可靠性分析技术失效模式和效应分析(FMEA)程序[S].北京:国家标准局,1987.
- [7] International Organization for Standardization. ISO16708-2006 Petroleum and natural gas industries pipeline transportation systems-reliability based limit state methods[S]. Switzerland: ISO,2006.
- [8] Canadian Standards Association. CSA Z662-2007 Oil and gas pipeline system[S]. Mississauga: CSA,2007.
- [9] 帅健.腐蚀管线的剩余寿命预测[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(4):91-93.
- [10] 方华灿,赵学年,陈国明.海底管线腐蚀缺陷的安全可靠性评估[J].石油矿场机械,2000,30(6):1-4.
- [11] ZHOU W, HUANG G (Terry), ZHANG S. Model error assessment of burst capacity models for corroded pipes[C]. IPC2012-90335,2012.
- [12] PANDEY M D. Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines[J]. NDT&E International,1998,31(5):349-358.
- [13] MADSEN H O, KRENK S, LIND N C. Method of structural safety[M]. Englewood: Prentice-Hall Inc,1986.
- [14] AVRAMIDIS A N, WILSON J R. Integrated variance reduction strategies for simulation[J]. Operations Research,1996,44(2):327-346.
- [15] 吴迪,张志霞,张艳.基于蒙特卡洛法的钢管腐蚀结构可靠性研究[J].石油工业技术监督,2012(6):31-33.
- [16] 冯秋芬,段志祥. Monte Carlo 法在含体积缺陷压力管道可靠性分析中的应用[J].湘南学院学报,2006,27(5):35-40.
- [17] DAVID D, OSCAR F. Effect of spatial correlation on the failure probability of pipelines under corrosion[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2005,82(2):123-128.

(收稿日期:2013-08-23; 修回日期:2014-04-20; 编辑:关中原)



基金项目: 中国石油大学(北京)科研基金资助项目“油气管网系统的状态空间建模与分析”, YJRC-2013-11; 河北省博士后科研项目择优资助项目“基于状态空间模型的天然气管网控制性能研究”, 项目编号20。

作者简介: 温凯, 讲师, 1983年生, 2012年博士毕业于北京大学力学系统与控制专业, 现主要从事油气管道可靠性设计的研究工作。

WEN Kai, Ph.D, lecturer, born in 1983, graduated from Peking University, mechanical system and control, in 2012, engaged in the research of reliability design of oil and gas pipeline.

Tel: 18531610986, Email: kewin1983@126.com