

# 油气管道可靠性的 极限状态设计方法

帅 健\*

石油大学(北京)

帅 健等. 油气管道可靠性的极限状态设计方法. 石油规划设计, 2002, 13(1): 18~21

**摘 要** 基于可靠性的极限状态设计方法是油气管道工程设计的发展趋势, 已为国际上先进的管道工业标准所采用。本文阐述了可靠性的极限状态设计方法的基本理论与概念。包括载荷条件和极限状态、概率性设计方法、分项安全系数校正、参数不确定性、安全类别和目标安全水平。最后指出我国的管道工业, 应该采用这一新的设计方法, 降低管道工程造价。

**主题词** 管道 系统设计 极限状态  
可靠性 概率 安全系数

传统的设计准则通常是以承受工作条件下的内压所需的管道承载能力为基础的, 故管道在正常运行条件下的环向应力必须小于其最小屈服应力与设计系数(或安全系数的倒数)的乘积。但在某些情况下, 这样的安全性水平裕量过大, 即偏于保守。另外, 现在采用的承受内压的管道的设计系数应与目前在制管过程中采用的制造质量和几何尺寸的要求相联系, 与早期制造的管子质量水平相比, 目前的工业技术可达到的管子质量水平要高得多, 管子质量也容易控制得多。这些事实已经使人们普遍地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。

国际标准化组织(ISO)最近给出了标题为“石油和天然气管道工业——管道输送系统——基于可靠性的极限状态方法”的新的设计标准<sup>[1]</sup>。在海洋结构工程方面极具权威的标准化组织 DNV 也将它的 1981 年版海底管道系统规范更新为 DNV' 96<sup>[2]</sup>, DNV' 96 也是以极限状态哲学为设计原则的。此外, 加拿大标准化组织也较早采用了极限状态的设计思想。与国际先进管道标准相比, 我国的管道标准、规范还存在一定的差距, 随着跨国管道工程建设和外商在我国投资管道建设工程, 促进管道标准与国际接轨是非常必要的。

## 载荷条件和极限状态

在管道的结构设计中, 必须考虑内压、外压、轴向载荷、弯曲载荷、冲击载荷及上述各种载荷的组合。内压与外压作用于整个管道系统(即整个管道和主要管道段); 轴向载荷、弯曲载荷和冲击载荷仅仅是作用在局部管段; 组合载荷在局部设计检验中往往处于支配地位。

无论是单个载荷还是组合载荷都引起一组极限状态, 每个极限状态将结构划分为安全状态和失效状态。在可靠性理论中, 极限状态可用功能函数予以精确描述。极限状态法分析现有管道在不同的项目设计方案中出现的失效状态, 根据管道结构的物理失效机理, 提出设计准则, 给设计者较大的灵活性, 使工程设计的保守程度降到最低限度。

按照油气管道失效的不同性质, 极限状态被分成 4 个类型: 服役极限状态、最终极限状态、疲劳极限状态和事故极限状态。

\* 帅 健, 男, 1963 年生, 教授, 博士。1982 年毕业于武汉化工学院化机专业, 现在石油大学(北京)机电学院从事工程力学和油气管道和储罐强度的科研与教学工作。通信地址: 北京昌平石油大学机电学院, 102249

(1) 服役极限状态定义了管道的正常使用能力, 涉及以下几个方面的设计检验: 屈服极限, 超过材料屈服强度的过量应力; 椭圆度, 妨碍清管器通过的过量椭圆度; 应变积累, 过量的塑性变形积累。

(2) 最终极限状态定义了管道的最大承载能力, 指: 爆破, 管壁由于过量的内压、腐蚀等引起的破裂; 断裂, 在拉伸载荷下缺陷的不稳定断裂和塑性蠕变; 屈曲, 在压缩载荷下, 平衡状态或稳定性的丧失; 蠕变, 超过极限承载能力。

(3) 疲劳极限状态指的是管壁由于在循环载荷作用下的疲劳裂纹扩展或损伤累积造成的泄漏。

(4) 事故极限状态定义了事故载荷或非正常条件下的最终承载能力。

传统的设计方法是以设计指南和规范的设计系数为基础的, 这种设计方法即为确定性的设计方法。

### 可靠性的设计方法

在传统的管道设计方法中, 相关的载荷、载荷效应和材料性能都被看作是确定性的量, 并明确规定了用于检验管材是否屈服的两个基本方程: 即环向应力判据和等效力判据。考虑到制造和运行中的不确定性因素, 由最小屈服应力除以安全系数(或乘以设计系数), 保证管道的承载能力。这种安全系数, 是在大量设计实践基础上得出的, 它反映了一定的统计特性。但是, 这种安全系数的方法还存在一定的缺陷:

(1) 把各种参数都当作定值, 没有分析参数的随机变化特性, 而实际的工程设计变量均为随机变量, 这是根本的缺点。

(2) 由于把设计参数视为定值, 没有分析参数散布情况对可靠度的影响, 因而使结构的安全程度具有不确定性, 所以安全系数不一定能代表结构的可靠程度。

(3) 由于安全系数的确定没有经过理论分析, 而只是根据经验确定, 难免有较大的主观随意性。从可靠性的角度看, 传统安全系数偏大偏小的可能性都存在。

现在采用概率性的设计方法的理由: 一是工程问题中所出现的现象本来就是概率性的; 二是为使预测的工作性能与实际的工作性能尽量一致, 需要考虑各种变化; 三是系统中各个部分的可靠性必须保持一致。从经济上考虑, 可以改进设计, 最大限度地降低整个工程的造价。从可靠性工程的角度来

讲, 设计中纳入了可靠性指标, 确保了安全性水平。

在可靠性理论中, 对于给定的极限状态, 其功能函数可以由广义上的统计载荷和统计阻力描述。例如, 用特征载荷  $S$  和特征阻力  $R$  表示的功能函数为:

$$g(x) = R - S$$

失效概率计算式为:

$$P_f = P(g(x) < 0) = P(R - S < 0)$$

通过统计分析, 可以建立  $R$  和  $S$  的分布函数。设载荷  $S$  为一连续随机变量, 有概率密度函数为  $f_s(S)$ ; 阻力  $R$  亦为一连续随机变量, 有概率密度函数为  $f_R(R)$ 。那么:

$$P_f = \int_0^{\infty} f_s(S) \left[ \int_0^S f_R(R) dR \right] dS$$

图1表示了应力  $S$  和强度  $R$  的概率密度函数曲线。图中阴影表示两曲线的重叠部分, 称为干涉区, 也是管道出现失效的区域。根据干涉区情况进行管道可靠性计算的理论称为载荷-阻力干涉理论, 这种模型, 也称为干涉模型。从干涉模型可以看出, 要确定管道的可靠度或失效概率, 必须研究载荷和阻力两个随机变量中, 一个超过另一个的概率。一般而言, 确定失效概率有两种方法, 即分析方法和模拟方法<sup>[3]</sup>。

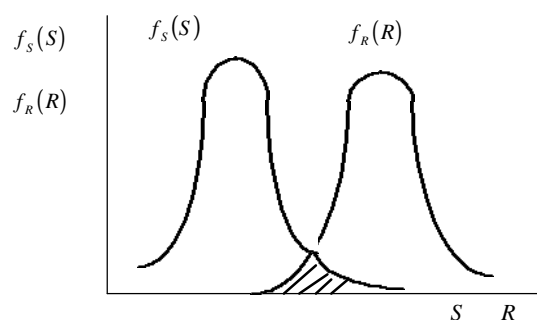


图1 载荷-阻力干涉图

概率性的设计方法中, 基本设计准则是规定设计寿命下的目标安全性水平, 通常用“失效概率”或“最小可靠度”表示。在这种设计方法中, 要考虑两方面的问题, 一是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; 二是给定目标安全性水平, 并用可以接受的判据检验。附加的问题是灵敏度分析, 并确定它们对应力和强度描述的影响。

## 分项安全系数校正

在传统安全系数设计法的发展过程中,考虑到由于单一安全系数不能对一切偶然事故均提供合理的保护,因此设想,用某种系数对某一方面提供所需要的保护,从而发展了一种修正的安全系数设计概念,即对于不同的设计参数,采用不同的安全系数。例如,对载荷等设计变量分别乘以一个系数,对阻力等设计变量除以一个系数,称为分项安全系数。在这种情形下,失效概率是以可接受的判据与分项安全系数的方式隐含给出的。分项安全系数是在可靠性分析基础上得出的,它反映了设计中的结构可靠性目标和变量的散布情况。根据所得的分项系数,能够按传统设计方法进行结构设计。

在管道工程设计中,典型的分项系数设计方法是因子化的载荷阻力设计(Load Resistance Factorized Design, LRFD)公式。LRFD公式的目标是通过载荷和阻力考虑管道在设计寿命中可能经历的各种重大极限状态,公式中应该包括最重要的设计变量。在海洋管道设计中,一个有代表性的LRFD公式为<sup>[4]</sup>:

$$g_E S_{CE} + g_F S_{CF} \leq \frac{R_C}{g_R}$$

式中:  $S_C$ ——所考虑失效情形的特征载荷;  
 $R_C$ ——所考虑失效情形的特征阻力;  
 $E$ ——环境载荷;  
 $F$ ——功能载荷;  
 $g_E$ ——环境载荷的分项安全系数;  
 $g_F$ ——功能载荷的分项安全系数;  
 $g_R$ ——特征阻力的分项安全系数。

其中 $g_E$ 、 $g_F$ 、 $g_R$ 需要用可靠性的方法校正。校正计算是一个复杂的迭代过程,第一步是选择一组建立在现行标准和经验判断基础之上的试验系数,第二步根据选择的安全系数,指定一组有代表性的设计情形,然后进行与之相关的失效概率评估。评估得出的失效概率水平与目标安全性水平比较,重新调整安全系数,重复整个过程,直到得出一组满意的系数。除非建立目标安全性水平,否则不能进行安全系数的校正,这不仅仅是单纯的理论计算,还需要收集来自管道工业各部门的基础数据。

## 不确定性模式

随机变量的概率分布代表了变量的不确定性。可靠性分析的结果对于概率分布函数的尾部非常灵敏,这意味着要选择合适的分布函数。分布函数的

确定包括选择分布形式、分布参数的估计及拟合分布的假设检验。管道设计问题中最常用的分布函数是:对数正态分布、正态分布、均匀分布、威布尔分布、甘布尔分布函数等。

在管道工程的概率设计中,要考虑3组基本的不确定性量度:管道钢基本性能参数的不确定性量度;载荷的不确定性量度;评估模式的不确定性量度。管道的性能取决于管子的类型(无缝与有缝焊接等)、材料类型(不同钢级)、制造方法和设计规范等等。所有的极限状态都与这些性能相关,它们的不确定性可以通过对实验数据的统计分析得到。

载荷取决于实际的设计情形,它的不确定性量度一定是按情形指定的。对于特定载荷的不确定性量度可以用标准化的形式表示为:

$$X_E = \frac{S_E}{S_{EC}}; X_F = \frac{S_F}{S_{FC}}$$

式中:  $S_E$ ——环境载荷的统计量;  
 $S_F$ ——功能载荷的统计量;  
 $S_{EC}$ ——环境载荷的特征值;  
 $S_{FC}$ ——功能载荷的特征值;  
 $X_E$ ——标准化的环境载荷;  
 $X_F$ ——标准化的功能载荷。

其中 $X_E$ 和 $X_F$ 的平均值也称为偏差。对于海洋管道,由于海洋环境的随机不确定性性质,环境载荷的方差比功能载荷的方差大得多。

模式的不确定性与评估的模式(例如计算管道爆破强度的分析方程)相关,它可以通过分析试验数据或完成高级的数值计算(例如有限元分析)得到。模式的不确定性量度应该与特定的极限状态共同提出。

## 目标安全水平

对潜在失效模式的安全要求是以安全类别为基础的,而安全类别是以管道位置和流体类别定义的,不同的规范有不同的定义。在ISO DIS 13623中描述的安全类别如下:

(1) 低的安全类别:意味着失效后果对人员伤亡的较低风险、较小的环境和经济影响。

(2) 正常安全类别:意味着失效后果对人员伤亡的低风险,有一些环境污染,经济和政治后果严重(这是对于海洋管道和其它临时条件的正常分类)。

(3) 高安全类别:操作条件的安全分类,意味着对人员伤亡具有风险,重大的环境污染和非常严

重的经济及政治后果。

(4) 非常高的安全类别：操作条件的安全分类，意味着对人员伤亡的高风险，重大的环境污染，非常严重的经济和政治后果。

可靠性的设计方法要求失效概率应该等于或小于于要求的目标水平，目标安全水平定义为对于一个可接受的特定设计的最大失效概率，它仅仅是一个与管道安全程度的概率描述相联系的名义参考值。合适的安全目标的确定，在可靠性设计方法中是一个非常重要的方面。

目标安全水平的选择的根本任务是从安全、可靠和经济的观点出发，实现一个可以为公众接受的安全可靠性。在管道安全目标的选择过程中，应该考虑到失效的性质、失效的后果以及为减少危害而需要做出的努力和付出的代价。确定管道目标安全水平的方法包括：与管道失效事故的统计资料比较；与现行管道设计标准隐含的可靠性水平比较。

Sotberg 等通过事故统计和工程判断，建议的目标可靠性如表 1<sup>[5]</sup>。

表 1 目标安全水平

	安全类别			
	低	正常	高	非常高
服役极限状态	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>
最终极限状态	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
疲劳极限状态	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>
事故极限状态	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>

## 结 论

虽然可靠性设计是一种更为合理的设计方法，但是目前推广起来还存在困难，这主要表现在 3 个方面：

(1) 缺乏足够的统计数据。可靠性设计法是以大量统计数据为依据的。原有设计用的数据，由于当时的认识和要求不同，不一定能满足可靠性设计要求。有些可靠性设计要求的重要数据，可能没有进行很好地统计，或在长期的数据统计期间被遗漏。而可靠性数据的积累，需要长期大量细致的工作。

(2) 工程设计人员对可靠性设计方法还不够熟悉。设计人员对各种设计任务，已经习惯于用传统的设计系数法进行设计。他们对概率统计的概念不太熟悉，对新的设计方法实行起来可能感到有些困难，难以抛弃原来的方法而用新的方法。而且任何新方法的应用都不免要承担一定的风险。

(3) 验收上的困难。到目前为止，还没有一套

行之有效的设计规范和验收标准，因此设计人员无章可循，而使用单位也难于判断管道工程结构是否达到了预期的目标。

我国油气管道的现行设计标准是采用安全系数的方法<sup>[6,7]</sup>（即传统的设计方法），但采用基于可靠性的极限状态设计方法是一个发展趋势。我国的管道工业，应该采用这一先进的设计理论，最大限度地降低油气管道的工程建设成本，并保障管道的安全可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] Torbjørn Sortberg, Kim J. Mørk, Serghios Barbas. ISO Standard Pipeline Transportation Systems: Reliability-Based Limit State Methods, Preceedings of the Ninth(1999) International Offshore and Polar Engineering Conference Brest. France, May 30-June 4, 1999
- [2] Mørk, K.J., Collberg, L., Bjømsen, T.. Limit State Design in DNV'96 Rules for Submarine Pipeline Systems : Background and Project Experience, OTC 8671, The Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 4-7 May 1998
- [3] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计. 北京: 国防工业出版社, 1993 (1)
- [4] Yong Bai, Ruxing Song. Reliability-Based Limit-State Design And Re-qualification of Pipelines, 17<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Fairfield, NJ, USA, 1998
- [5] GB50251-94. 输气管道工程设计规范. 中国计划出版社, 1994
- [6] Torbjørn Sotberg, Torgeir Moan, Roberto Bruschi, Guoyang Jiao, Kim J Mørk. The Superb Project: Recommended Target Safety Levels for Limit State Based Design of Offshore Pipelines, 1997 OMAE-Volume V, Pipeline Technology, ASME 1997
- [7] GB50253-94. 输油管道工程设计规范. 中国计划出版社, 1994

收稿日期：2001-4-6

编辑：檀建超

# ABSTRACTS

Jan. 2002, Vol. 13, No. 1

## 1 The Current International Trends in Energy Resources Development

Jiang Shi'ang

The current international trends in energy resources development are :upgrading of transportation fuels ;the share of natural gas in global energy mix is growing , meanwhile the development of DTL technology is focused ; alternative transportation fuels are in the ascendant ; and renewable energy as a new force suddenly comes to the fore. Then the trend of development in global energy mix and majors evolving from integrated oil companies to total energy companies are introduced. Finally , several problems for consideration are presented.

## 8 The Pending Issues in Development of Gasohol in China

Zhang Li'an et al.

Expounded the spreading of gasohol in China and abroad. Summarized the studies of gasohol. On the basis of gasohol development experiences abroad and the characteristics of gasohol itself put forward the advice on standard, tax revenue policy , price system and developing course of the development of gasohol in China.

## 11 The New Labor Safety Hygiene Assessment Model of the West-to-East Gas Pipeline Engineering

Zhou Xihe et al.

The West-to-East Gas Pipeline goes from northwest to southeast , from Gobi desert , loess plateau to the Yangtze River Delta area crisscrossed with rivers. There are variety of natural calamity factors and secondary calamity factors caused by human economic activities impacting to the Engineering safety ; In addition , the transported natural gas has the flammable , explosive and diffusible properties , the pipeline has the longest route , largest diameter, highest transmission pressure and largest flow rate in China , the pipeline itself has high potential risk. Based on the specific feature of the engineering , introduced the establishment of the new preliminary assessment model of the Labor , Safety and Hygiene , the system safety engineering , the knowledge of the fracture mechanics , the reliability theory , the introduction and application status of PIRAMID software and HSE management system for the West-to-East Gas Pipeline Engineering.

## 15 A Discussion on Improvement Direction for the Development Specification of the Feasibility Study of the Refinery and Petrochemical Projects

Zhang Fuqin

Along with the rapid development of the market economy in China the state economic policy such as tax system is changing. Meanwhile the stock companies have had been set up from the petroleum refinery and petrochemical groups such as PetroChina, Sinopec and CNOOC. Those changes have put forward new requirement to the development specifications of the feasibility study of the refinery and petrochemical construction projects. The article gives the analysis and improvement suggestion for the development

specifications of the feasibility study of the refinery and petrochemical construction projects with respect of meeting tax system changing , enhancing market prediction and risk analysis.

## 18 The Reliability-based Limit-state Design Method

Shuai Jian

The reliability-based limit-state design method has been showed to be a development tendency in oil & gas pipeline engineering. It is adopted by international advanced pipeline standards. The method provides specific design criteria in terms of the failure modes related to the different project plans. It gives designer flexibility and makes pipeline design less conservative , whereas the safety level is not reduced. This paper discussed the basic concepts and theories of reliability-based limit-state in pipeline design. It contains load conditions and limit states , probabilistic approach, calibration of partial safety factors , parameter uncertainty , safety class , target safety standards. Finally , it is pointed out that pipeline industry in China should apply this new method and reduce engineering cost in pipeline construction.

## 22 A Study of Energy Saving and Loss Reduction of the Oilfield Water Injection System

Zou Longqing et al.

The article studied the correlation and close relation of the different parts of the water injection system , the mutual influence and changing of the energy consumption of the different parts. The Author considers : the parts of water injection system are correlated and impacted each other ; energy saving by reducing of the pump-pipe depression is restricted under certain condition ; the optimization of the water injection stations should be carried out under the united target of the system optimization ; the system operation optimization can only make full use of the existing equipment , it is necessary to carry out the technical revamp of the system equipment ; the application of variable-frequency technique will give better energy-saving effect to the variable speed object and whole system.

## 25 A Study of Oil Products Mixture Experiment on the Sequence Transmission along the Lanzhou-Chengdu-Chongqing Product Pipeline

Li Li et al.

The article defined the transmission sequence of the Lanzhou-Chengdu-Chongqing product pipeline ,carried out the mixture test and analysis between the oil products , between the oil product and distillate , between the distillates , considered the impact of residual amount of different oil products , defined the allowable composition of the oil mixtures and the quality control index of the oil mixtures. The test results , calculation results by empirical formula and the test data demonstrated : due to the property difference of the oil products the allowable composition of the oil mixture differs obviously , it is necessary to use the measured data or corrected calculation result by empirical formula for the designing purpose.

## 28 The Sea Water Injection Technology in Shengli Chengdao Oilfield

Peng Gang et al.

Based on the sea water injection system on the Chengdao Center 2 platform of Shengli Oilfield the article introduced the sea water quality variation during the four seasons of the year under different natural condition. The article also introduced the adopted technological flow diagram of the sea water injection system , sea water purification technology ,sea water deoxidation technology ,and the operation status. Put forward the solving measures against the existing problems.