



中华人民共和国国家标准

GB/T 29167—2012/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

Petroleum and natural gas industries—Pipeline transportation systems—
Reliability-based limit state methods

(ISO 16708:2006, IDT)

2012-12-31 发布

2013-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 Ⅲ

引言 Ⅳ

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号和缩略语 5

5 设计和运行的原则 6

6 基于可靠性的极限状态方法 8

 6.1 一般要求 8

 6.2 设计和运行基础数据——数据收集 8

 6.3 安全要求——目标 8

 6.4 失效模式分析 8

 6.5 不确定性分析 9

 6.6 可靠性分析 9

 6.7 安全和风险评价 9

7 设计和运行要求 10

 7.1 一般要求 10

 7.2 设计和施工 10

 7.3 运行和维护 10

 7.4 再评定 10

 7.5 危害 11

8 验收准则和安全等级 11

 8.1 安全要求 11

 8.2 极限状态分级 11

 8.3 流体分类 12

 8.4 管道地区和后果分类 12

 8.5 安全等级 13

9 目标安全水平和风险级别 14

10 失效模式 14

 10.1 概述 14

 10.2 内部压力导致的失效模式 14

 10.3 外部压力导致的失效模式 14

 10.4 外部载荷效应导致的失效模式 15

 10.5 第三方活动导致的失效 15

 10.6 腐蚀环境导致的失效模式 15

 10.7 组合载荷导致的失效 16

11 管道运行管理	16
11.1 一般要求	16
11.2 运行管理规程	16
附录 A (资料性附录) 不确定性和可靠性分析——方法描述	19
A.1 概述	19
A.2 不确定性分类	19
A.3 概率分布的确定	20
A.4 统计不确定性的评估	22
A.5 变量的联合描述	23
A.6 典型的不确定性度量	24
A.7 可靠性分析	26
A.8 可靠性计算方法	27
A.9 结果的解释	29
A.10 LRFD 格式中分项安全系数的校准	30
附录 B (资料性附录) 统计数据库——不确定性取值	34
B.1 管线管基本性能	34
B.2 最大内压——海洋管道(不包括陆上段)	37
B.3 载荷效应不确定性——海洋管道	37
附录 C (资料性附录) 目标安全水平——推荐方法	40
C.1 概述	40
C.2 选择目标安全水平的原则	40
C.3 管道失效数据	41
C.4 结构设计标准中的安全水平	42
C.5 推荐的目标安全水平	43
参考文献	46

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 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》。

本标准做了下列编辑性修改：

- 删除了 ISO 16708:2006 的前言和引言；
- 增加了本标准的前言和引言；
- 用“本标准”代替“本国际标准”。

本标准由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本标准起草单位：中国石油天然气股份有限公司管道分公司、中国石油天然气管道工程有限公司、中国石油天然气集团公司北京天然气管道有限公司、中海油田服务股份有限公司物探事业部。

本标准主要起草人：苗青、闫锋、李云杰、徐波、赵子峰、董绍华、李成钢、柳建军、兰浩、王龙、李其抚、王玉彬、张静楠。

引 言

本标准是以 GB/T 24259—2009《石油天然气工业 管道输送系统》为核心的管道业系列标准之一。只要满足 GB/T 24259—2009 的最低要求,本标准允许使用创新的技术和工艺方法,如基于可靠性的极限状态方法。

本标准对应用概率方法——“基于可靠性的极限状态方法”,在给出推荐做法、指定框架和原则方面,对 GB/T 24259—2009 提供了补充。

管道在设计和运行期间的完整性管理采用以下两种极限状态方法:

——确定性方法,对特征载荷和抗力应用安全系数;

——概率方法,以对相关极限状态应用结构可靠性分析为基础,例如,基于可靠性的极限状态方法。

通常采用确定性方法(通过预校安全系数),也可明确要求采用概率方法(在实际安全水平上的直接校核)。两种方法都满足安全要求,如图 1 所示。

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

1 范围

本标准规定了石油天然气工业中,为使用 GB/T 24259—2009 允许的基于可靠性的极限状态方法进行管道的设计、运行和再评定所需要的功能要求和原则。基于可靠性的极限状态方法为在设计和运行中预测管道的安全性提供了系统的方法。

本标准适用于石油天然气工业中陆上和海上刚性金属管道。

本标准是对 GB/T 24259—2009 的补充,在 GB/T 24259—2009 没有提供明确规定和可以应用极限状态方法的情况下采用,如下列情况(但不限于这些):

- 对新概念的评定,如使用新技术或对于行业经验不足的设计;
- 由于设计基础改变而进行的对管道的再评定,如服役期延长,其可以包括由于完整性监测的改进和运行经验的增加而带来的不确定性的降低;
- 在深水外部压力下的失稳;
- 极端载荷,如地震载荷(如断层通过处)、冰载荷(如来自大型冰凌的冲击);
- 基于应变的准则可以适用的场合。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 24259—2009 石油天然气工业 管道输送系统(ISO 13623:2000,MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

基本变量 basic variable

引入极限状态函数中的载荷或抗力变量,包括说明极限状态函数自身模型不确定性的变量。

3.2

特征载荷 characteristic load

用于确定载荷效应的载荷的名义值。

注:特征载荷一般是根据载荷分布函数上侧定义的一个分位数来确定的。

3.3

特征抗力 characteristic resistance

用于确定承受能力的强度参数的名义值。

注:特征抗力一般是根据抗力分布函数下侧定义的一个分位数来确定的。

3.4

特征值 characteristic value

表征随机变量量级的名义值。

注：特征值通常定义为变量概率分布的一个分位数。

3.5

投产 commissioning

与管道系统最初充装管输流体有关的活动。

[GB/T 24259—2009]

3.6

施工 construction

安装、试压和投产的过程。

3.7

设计寿命 design life

确认可更换或永久性部件在预期服役期内适用而选择的时间段。

[GB/T 24259—2009]

3.8

设计点 design point

当失效发生时基本变量最可能的结果。

注：设计点是极限状态面上具有最高概率密度的点。

3.9

设计值 design value

在确定性设计方法中使用的值，即：特征值乘以安全系数。

3.10

失效 failure

部件或系统完成其所要求功能的能力的丧失。

3.11

流体类别 fluid category

按照潜在危害性对所输流体进行的分类。

3.12

重要性因子 importance factor

描述某随机变量对整体不确定性贡献的无量纲数，在 0~1 之间取值。

3.13

检查 inspection

确定管道系统或装置的各项状态并与其应用要求相对比的过程。

例如：检查可以通过测量、检验、试验、计量或其他方法进行。

3.14

极限状态 limit state

一旦超出，管道便不再满足设计要求的状态。

注：管道极限状态的类别包括适用性极限状态(SLS)和最终极限状态(ULS)。

3.15

极限状态设计 limit-state design

与实际案例相关的具体极限状态已明确定义时的结构设计。

注：极限状态设计可采用确定性方法或概率方法(当不确定性可通过模型描述时)校核。

3.16

极限状态函数 limit-state function

基本变量的函数,其在结构失效时取负值,在结构安全时取正值。

3.17

载荷 load

所有引起管道变形、位移和运动等的作用。

3.18

载荷组合 load combination

同时作用的一组载荷。

3.19

载荷效应 load effect

作用于管道上的单一载荷或载荷组合引起的效应。

例如:载荷效应包括应力、应变、变形和位移等。

3.20

地区等级 location class

基于人口密度和人类活动划分的地区等级。

[GB/T 24259—2009]

3.21

维护 maintenance

为保持管道系统处于正常运行而实施的所有活动。

[GB/T 24259—2009]

注:这些活动包括检查、勘察、试验、维修、更换、补救工作及修理等。

3.22

最大允许偶然压力 maximum allowable incidental pressure; MAIP

管道或管段的偶然操作引起的最大允许内压。

3.23

最大允许操作压力 maximum allowable operation pressure; MAOP

操作过程中管道系统或其部分允许达到的最大允许压力。

[GB/T 24259—2009]

3.24

均值 mean value

所考虑变量的概率分布函数的一阶统计矩。

3.25

工厂试验压力 mill test pressure

在工厂制造和组装完成的管接头和管件的试验压力。

3.26

模型不确定性 model uncertainty

当所有输入参数的精确值已知时,对于所选择的计算模型仍然存在的预测结果的不确定性。

例如:管道的载荷模型、强度模型和功能模型等。

3.27

公称壁厚 nominal wall thickness

管子的规定壁厚,等于最小设计壁厚加上制造负偏差以及腐蚀裕量。

3.28

正常操作 normal operation

管道预期使用和应用的工况,包括相关条件和完整性监测、维护和修理等。

注:正常操作包括全设计流量范围下的稳态流动工况,以及可能的充装和停运工况。

3.29

椭圆度 ovality

管道周界偏离圆形,而具有了椭圆形截面的量度。

3.30

管道 pipeline

输送流体的设施,包括管子、清管器收发筒、部件和附件、以及隔断阀等所有设施。

3.31

海洋管道 offshore pipeline

铺设在海水中和通常为高水位的河流入海口处的管道。

[GB/T 24259—2009]

3.32

陆上管道 on-land pipeline

铺设在地上或埋地的管道,包括铺设在内陆水域下的管道。

[GB/T 24259—2009]

3.33

可靠性 reliability

在规定的时段内部件或系统完成所要求功能而不失效的能力。

注:可靠性等于1减去失效概率 P_f 。

3.34

风险 risk

事件的概率和该事件后果的组合。

注:个人风险对应单个人的伤害/死亡风险,社会风险对应整个社会中受管道影响人群的安全风险。

3.35

安全等级 safety class

划分管道危害程度用的概念。

3.36

安全系数 safety factor

用以与变量特征值相乘得到设计值的系数。

3.37

规定的最小抗拉强度 specified minimum tensile strength;SMTS

材料采购所依据的规范或标准中要求的最小极限抗拉强度。

3.38

规定的最小屈服强度 specified minimum yield strength;SMYS

材料采购所依据的规范或标准中要求的最小的屈服强度。

[GB/T 24259—2009]

3.39

系统可靠性 system reliability

包含多个元件的系统的可靠性,或者有多个相关失效模式的单元件的可靠性。

3.40

目标安全水平 target safety level

对于特定管道和极限状态条件可接受的最大失效概率水平。

4 符号和缩略语

4.1 符号

C	适用性约束向量
C_f	给定失效的后果
D	管径
d	冲击凿沟深度
d_d	冲击的凹痕深度
f	椭圆度
f_c	材料性能的特征值,例如屈服强度
f_{imp}	冲击发生的频率
$f_x(x)$	联合分布函数
$g(x)$	极限状态函数
$H(x)$	事件边界函数
$I(x)$	指示函数
ΔK	应力强度因子范围
L	冲击凿沟长度
P_f	失效的概率,即计算的实际失效率
$P_{f,target}$	目标安全水平,等于失效的目标概率
p	随机的压力变量
R	抗力或结构或部分结构抵抗载荷效应的能力
R_c	基于材料性能的特征值的部件抗力的特征值
S	作用于结构或部分结构上的载荷效应
S_c	特征载荷效应
$S_{c,E}$	环境载荷效应
$S_{c,F}$	功能载荷效应
t	时间
$\Delta\alpha$	附加分项几何量
η_R	抗力或强度惯用系数
λ	尺度参数
γ	安全系数
γ_i	分项载荷效应系数
γ_m	分项材料系数
σ_u	最终拉伸强度
σ_y	屈服强度

4.2 缩略语

ALS	偶然极限状态
CTOD	裂纹尖端张开位移
FLS	疲劳极限状态
LRFD	载荷和抗力系数设计
MAIP	最大允许偶然压力
MAOP	最大允许操作压力
QRA	定量风险评价
SLS	适用性极限状态
SMTS	规定的最小拉伸强度
SMYS	规定的最小屈服强度
SRA	结构可靠性分析
ULS	最终极限状态

5 设计和运行的原则

管道设计和运行的各项原则可以通过不同的方法来实现,其层次细节见图 1。按层次细节展开的顺序,这些方法分为概率方法和确定性极限状态设计方法。概率方法包括 QRA 方法和 SRA 方法。确定性极限状态设计方法包括分项安全系数设计和载荷与抗力系数设计(LRFD),在本标准中统称 LRFD 方法。

LRFD 格式将分项安全系数应用于特征载荷和抗力性质上,代表了更为传统的管道设计方法。在 GB/T 24259—2009 中使用了该设计格式,即使用了环向应力设计系数和等效应力设计系数,这仅仅是一个分项系数。因为其未给出关于安全裕量的定量信息,所以此方法被归类为确定性方法。为满足设计要求和提供满意的安全裕量,LRFD 格式中的分项安全系数在发布前应该采用基于可靠性的方法进行校核。因而,LRFD 格式在常规应用中不要求确定分项安全系数。在 LRFD 方法中(参见图 1 的左部),载荷和抗力通过它们的特征值定义,并且对于载荷、抗力和材料性能的特征值分别应用不同的分项安全系数(正如所要求的)。

概率方法的应用(SRA 和 QRA)包括在图 1 右侧列出的步骤中。极限状态的定义大体上与在 LRFD 中的相同。在该方法中,载荷效应和抗力通过概率函数表达,以分布类型、均值和标准差的形式给出。这种方法归类为概率方法,其以可靠性或失效概率补数的方式给出了关于安全裕量的定量信息。由于考虑了失效的后果,所以最全面的概率方法是 QRA。

基于可靠性的极限状态方法的格式和要求见第 6 章。

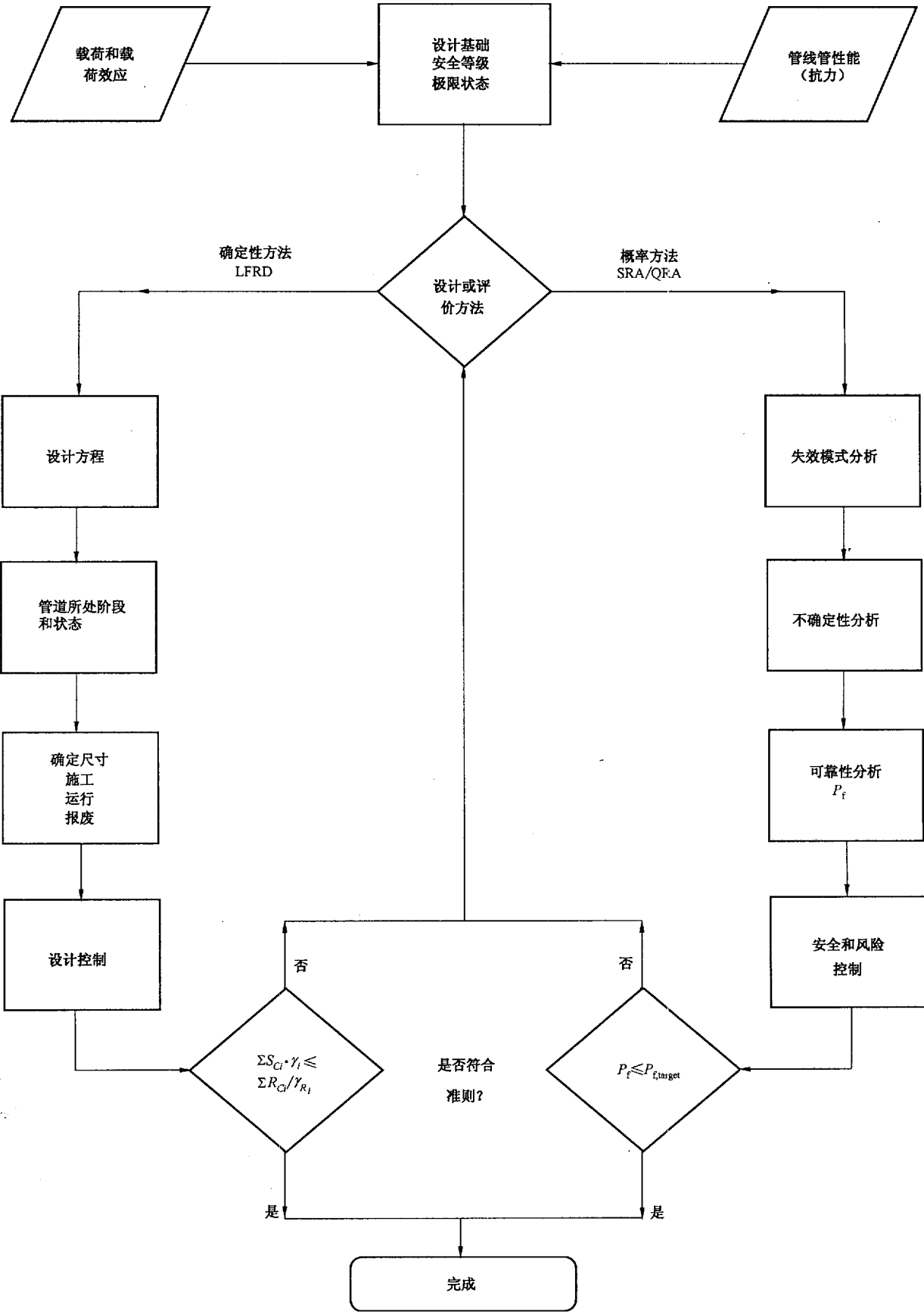


图 1 管道设计和评价方法

6 基于可靠性的极限状态方法

6.1 一般要求

使用基于可靠性的极限状态方法的步骤应包括：

- 确定设计和运行的基础数据：数据收集，见 6.2；
- 确定安全要求：目标，见 6.3；
- 失效模式分析；见 6.4；
- 包括概率函数估计的不确定性分析；见 6.5；
- 可靠性分析，见 6.6；
- 安全和风险评价，见 6.7。

6.2 设计和运行基础数据——数据收集

数据收集工作要收集和定义所有与要考察的管道有关的信息，并应包括下列信息：

- a) 设计基础和运行信息包括：
 - 管道系统的特性，如：管径、管道长度、产品组分、运行条件（压力、温度）、设计寿命和相连设施；
 - 载荷和载荷效应的定义以及相关危害；
 - 管线管性能（抗力）的定义和相关管道输送能力；
 - 运行检查和监测的理念，如完整性管理计划。
- b) 危害识别和失效条件的分级包括：
 - 极限状态条件的确定，包括经判断与安全性要求和限制条件相悖的管道的结构不一致性，如：供量不足或停止、流体的损失、没有流体损失情况下的可操作性或适用性的丧失等；
 - 依据载荷、抗力和功能劣化确定管道如何能发生结构性的不一致，即危害识别。

确定运行要求以及对失效条件的分类应按照第 7 章和第 8 章的要求执行。

6.3 安全要求——目标

本步骤的目的是为危害/失效模式定义相关的安全要求，主要包括：

- a) 应根据第 8 章中的地区和后果分类为所有管段定义目标安全水平；
- b) 应对管道设计寿命中的所有阶段，如施工、正常运行和临时状态来定义目标安全水平。

目标安全水平应基于公众安全、环境和商业活动等，考虑社会公认的安全和适用性原则、地方法规、相关的特定公司以及所针对管道的功能要求。

这些目标宜清晰地通报给所有利益相关方。

目标安全水平应按照第 8 章和第 9 章的要求确定。如果没有预先确定风险和（或）安全水平，可根据当前技术现状和设计实践参照附录 C 确定等效的目标失效概率 $P_{f, target}$ 。

6.4 失效模式分析

本步骤的目的是识别所有相关失效模式（发生概率大于相应条件下目标安全水平的显著危害）。包括的步骤有：

- a) 为评估所有已识别风险的严重性所进行的数据收集工作；
- b) 对照目标安全要求，评估每个危害，以确定各个危害是否是可能但难以置信的（例如：飞机坠毁在某管道上），还是既可能又可信的（如腐蚀）。

这种分析可以采用半定量的方式进行,如:估计某个危害的重现期低于 $10^{-5}/(\text{km} \cdot \text{a})$,小于目标性能要求,意指该危害不严重,不必进行概率评估,可在后续的分析中将其排除。

应按照 8.2 中给出的分级要求考虑失效状态。应对任何确定为“可能但难以置信”的危害的分级说明理由,例如理由可以是危害发生的频次。应在不确定性和可靠性分析中包括显著的(可能又可信的)的失效条件。

6.5 不确定性分析

在不确定性分析中,应考虑显著的失效条件,包括:

- 为减缓(或能够减缓)该危害而采取的所有措施;
- 确定评估和识别最相关极限状态函数的适用方法,如破裂、泄漏等;
- 收集量化极限状态函数中的变量所需的数据;
- 与数据和极限状态函数(模型不确定性)相关的不确定性评估;
- 为所有变量参数适当赋值。

可以参照附录 A 给出的程序进行不确定性分析和概率建模。如果没有其他适用的个案信息,可在附录 B 中寻找不确定性度量值。不确定性建模宜包括进入极限状态方程的所有变量。除关于分布函数的信息外,最相关的统计学性质是均值和标准差。参数间的任何关系都是重要且应予评价的。

示例:对于管道的外部腐蚀,减缓措施可以是以下任一种的组合:腐蚀裕量、防腐涂层、阴极保护系统、检查和修理方案等。需注意的是,执行一项检查、监测和修理方案可以有若干种方法。

6.6 可靠性分析

可靠性分析是要针对每个已识别的显著极限状态计算失效概率(P_f)。步骤如下:

- 极限状态函数的概率建模,即失效准则的解析表达方式。对于给定的极限状态,概率设计对载荷 S 和抗力 R 建模。相应的极限状态函数可以表示成式(1):

$$g(x) = R - S \quad \dots\dots\dots (1)$$

- 针对某个特定问题和精度水平选择最合适的概率计算方法,方法可包括一次二阶矩法(FOSM)、“可靠性”方法(FORM/SORM)、蒙特卡罗(Monte Carlo)法或直接积分法。
- 进行概率计算,即,计算每个相关极限状态的失效概率。当极限状态函数的统计学特性定义后(载荷效应和抗力性能),即可进行可靠性分析。当通过不确定性分析建立了关于 R 和 S 的分布函数后,通过式(2)计算失效概率:

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_{R,S}(R,S) dR dS \quad \dots\dots\dots (2)$$

可以参照附录 A 中给出的指南或其他相关计算程序执行可靠性分析。

计算出的失效概率并非管道的物理特性,而是给出了一个标记值。该计算出的失效概率取决于所采用的方法和步骤,包括数据和方法的不确定性。本标准的目的正是要规范用于基于可靠性分析的方法和步骤,并进而使该做法达到在行业内具有可比性的水平。

6.7 安全和风险评价

本步骤校核管道是否符合安全要求(准则)。可靠性应与这些要求相对比以确保:

$$P_f \leq P_{f, \text{target}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

P_f ——由可靠性分析计算出的失效概率;

$P_{f, \text{target}}$ ——可接受的设计和/或运行不宜超出的目标安全水平。

如果不满足要求,宜修正管道细节并重新评价(图 1 中新一轮循环)。

应用式(3)时,应针对个体或系统的失效模式,使用正确的时间和空间单位以及设计寿命中的正确阶段(如运行或临时阶段),来进行正确的比较。

选择用来减缓失效的物理设计参数(如:壁厚)应满足所有性能要求。

安全校核应按照第 8 章和第 9 章执行。

海洋和陆上管道的安全原则是类似的,但失效后果和安全等级的差异会导致对目标安全水平 $P_{f,target}$ 的要求不同。

无论是海洋还是陆上管道,控制失效概率(P_f)作为后果的函数都是合适的,正如通过指定安全等级(参见第 8 章)以获得统一风险水平而建立的函数。对于陆上管道,为说明管道压力和直径对失效后果的影响,可接受失效概率也是这些参数的函数。通常,取得统一的风险水平是所有应用的目标。

当风险计算结果是失效概率与失效后果的乘积时,式(3)等效于式(4)。

计算风险 $\leq$ 允许风险 (4)

目标安全水平 $P_{f,target}$ 是从风险评价中得出的,参见附录 C。若没有进行其他明确的风险评价,这些值是可以使用的。

在基于可靠性的方法中要全面考虑更多的技术细节和要求,见第 7 章~第 10 章以及参见附录 A。

7 设计和运行要求

7.1 一般要求

应在管道的整个寿命期内,针对施工和运行期间(包括再评定)的所有条件,校核潜在失效模式的安全性。

7.2 设计和施工

管道的设计和施工应满足下列性能要求:

- a) 在所有预期载荷效应下充分发挥性能(适用性极限状态要求);
- b) 承受施工和运行期间预期的载荷效应(ULS 要求);
- c) 避免施工和运行期间交变载荷效应作用下失效(ULS——疲劳要求);
- d) 避免施工和运行期间因事故导致的失效(ULS——偶然性要求)。

7.3 运行和维护

管道的运行和维护应使安全性和完整性保持在目标安全水平内。

运营者应执行完整性管理程序以满足本标准给出的安全要求。维护包括检测要求、特殊情况下的检测(如:在事故或严重的环境事件后)、保护系统的升级和部件的修理等。

管道的完整性可以通过维护程序和/或设计避免管道功能劣化的方法来实现,管道在未能或未被维护地区的功能劣化会影响其完整性。

可基于数值计算、实验检验以及来自其他管道的经验或者上述方法的组合来估计管道功能劣化的速率。

7.4 再评定

在下列情况下应对管道完整性进行再评定:

- 延长设计寿命;
- 已发现管道功能劣化或严重受损;
- 管道需要升级;
- 运行条件改变;

——原设计准则或设计基础不再有效。

根据本标准重新进行的安全评价应针对与原始设计要求不一致的设计中的各个方面执行。

再评定可能需要偏离设计基础或者对管道改造或修改运行条件以达到与本标准一致的要求。

7.5 危害

应将正常运行时单独或与载荷组合后可能损害管道完整性的危害,当作 ULS——ALS 的一部分加以考虑。

对管道的可能危害包括:

- 极端环境载荷效应;
- 来自第三方活动的影响;
- 运行故障。

减缓此类危害的措施包括:

- 通过消除危险源或绕避及克服危害来避免危害的结构效应;
- 使后果最小化;
- 针对危害的设计。

8 验收准则和安全等级

8.1 安全要求

对于特定管道,目标安全水平 $P_{f,target}$ 应定义为最大可接受的失效概率水平。建立应用可靠性方法的设计准则需要目标安全水平。在运行和维护期间通过完整性管理程序来满足这些准则。

对管道目标安全水平的评价宜主要基于固有的安全水平,采用具备相关设计实践基础的同期代表性不确定性方法进行评价,固有安全水平通过使用当前被接受的设计实践(如规范或标准)而得到。宜考虑:失效的本质;对人员健康和安全、对环境的损害和经济损失影响的潜在后果;以及为降低此类潜在危害需要的费用和努力。

应根据以下考虑确定目标安全水平:

- 极限状态类型,见 8.2;
- 所输送的流体,见 8.3;
- 管道所处地区和潜在的后果,见 8.4。

安全分级要综合考虑流体类别、位置和潜在后果,见 8.5。与管道运行相关的风险定义为式(5):

$$\text{风险} = \text{失效概率}(P_f) \times \text{失效后果}(C_f) \dots\dots\dots (5)$$

目标安全水平可以随着失效后果变化而提供相对固定的风险水平,见第 9 章和参见附录 C。

注:主要目的是从安全和经济角度得到一个可接受的管道可靠性。重要的是在符合监管和主管机构要求的前提下将所有这些考虑整合到分析当中。

8.2 极限状态分级

应采用一组包含显著失效模式的极限状态或失效函数来描述管道的结构性能。每个极限状态将结构性能分为两种状态:安全状态和失效状态。结构设计意味着对于每种极限状态都满足设计要求。在管道的设计中应考虑下列两类主要的极限状态:

- SLS,超出此极限管道就不满足其功能要求,如:椭圆度、棘轮变形、累积的塑性应变、过度变形或位移、涂层损伤或损失等;
- ULS,超出此极限管道就会经历结构完整性损失,如:爆管、破裂、局部或全部屈曲、不稳定断裂和塑性失稳等。FLS 是由累积周期性载荷导致的疲劳引起的 ULS 条件;ALS 是针对低概

率事件中极端载荷效应的 ULS 条件,如坠落物体、拖网时与鱼网咬合缠绕、地震等。

在第 10 章给出了管道设计和施工中要考虑到各种载荷效应及其相关极限状态的规定。

注: FLS 和 ALS 都当作最终失效条件考虑并属于 ULS 类。然而,通常为说明特定失效的特征而对它们分别处理。

FLS 是一个累积过程而 ALS 是一个随机瞬时过程。在 ALS 的评估中考虑偶然事件的发生概率。

8.3 流体分类

按照对于公众安全的潜在危害(按照 GB/T 24259—2009),管输流体应归到下列五类之一(见表 1):

表 1 流体分类

流体类别	描 述
A	典型的水基非易燃流体
B	在环境温度及大气压力下是液体的易燃和/或有毒流体,典型的例子就是石油及石油产品。甲醇就是一种易燃且有有毒的流体
C	在环境温度及大气压力下是无毒气体的非易燃流体。典型的例子是氮气、二氧化碳、氩气和空气
D	无毒、单相的天然气
E	在环境温度及大气压力下是气体的,并可以作为气体和/或液体输送的易燃和/或有毒流体。典型的例子:氢气、天然气(D 类里的除外),乙烷,乙烯,液化石油气(如丙烷及丁烷),天然气凝析液,氨及氯气

在表中没有特别说明的气体或液体,宜将其与潜在危害性非常相似的流体归为一类。如果这种归类仍不够明确,则应考虑归到危害性更大的类别中。

8.4 管道地区和后果分类

应针对表 2 中描述的各要素评价管道失效(C_i)的潜在后果。

表 2 评价潜在后果时的需考虑的要素

要素	需要考虑的事项
公众安全	人口密度和人体暴露的潜在性、点燃和着火的潜在性、产品的毒性
环境影响	土地的用途、产品的类型、输送流量、泄漏量、地形、海滩影响、高后果区域和超敏感区域
商业损失	维修成本、输量损失、产量减少,对资产剩余寿命的影响
公司声誉	汇集所有后果因素,监管机构惩罚行动和媒体曝光的范围

需考虑要素的重要性取决于管道(管段)所处地区,且对于海洋和陆上管道是不同的。一般应给予公众安全以最高的重视,同时从公司自身出发考虑经济性。

海洋管道的后果评价应依次考虑与平台的接近程度、近岸或登陆处、环境敏感地区以及任何特殊的费用等。

对于陆上管道,应考虑人口密度、管道流体、管径和压力、环境影响和成本。对于陆上管道可以采用根据 GB/T 24259—2009 附录 C 中建议的地区分类原则(依据人口密度),也可以根据国家对于公众安全的特殊要求采用其他分类方法。

在确定对人员安全和环境损害的风险等级时(即后果分类时),可考虑及时探知特定载荷危害的能力,以便执行保证人员安全和环境保护的应急响应计划。

8.5 中推荐了一种典型的分类方法,通过引入安全等级说明后果随地区、流体类型、管道条件和失

效模式的可变性。

8.5 安全等级

为说明失效后果,管道应归到表 3 中下列 4 种安全等级之一。

表 3 安全等级

等 级		描 述
1	低	对人员伤害的风险可以忽略以及环境和经济后果较小
2	一般	对人员伤害的风险很低、环境影响较小或经济政治后果较高
3	高	存在人员伤害风险、环境影响显著的或经济政治后果非常高
4	非常高	对人员存在高风险伤害

安全等级定义是基于管道所处地区和流体分类的。应对管道整体或其部分进行安全定级。

除非经济和环境的后果要求更高的安全等级,对于海洋和陆上管道可以分别应用表 4 和表 5 中给出的安全等级。业主也可以要求比表 4 和表 5 中要求的更高的安全等级。

表 4 最低安全等级——海洋管道

管道所处阶段	流体分类 ^a	后果/地区分类		
		海洋和偏远地区	平台区	登陆地带
施工	NA	低		
运行	A,C	低		
	B	一般	一般	一般
	D,E	一般	高	高
^a 见表 1 中字母的定义。				

表 5 最低安全等级——陆上管道

管道所处阶段	流体分类 ^a	后果/地区分类			
		人口密度极低的 偏远地区	人口密度中等	人口密度高	人口密度极高
施工	NA	低			
运行	A,C	低			
	B	低	低	一般	高
	D,E	低	一般	高	很高
^a 见表 1 中字母的定义。					

海洋管道的平台区和管道登陆段应至少将平台和(或)登陆地带的外部边界延长 1 000 m。

对于陆上管道,已经建议了 4 种不同等级的地区/后果分类方法及相应的安全等级划分。在附录 C 中给出了与此分类数相关的目标安全水平,其中对于失效后果也相应非常高的情况选择高和非常高的安全等级。只要遵照本标准给出总的安全框架,也可以采用不同分类方法,即可以采用 3 级或 5 级的安

全分组法。

9 目标安全水平和风险级别

基于可靠性的设计要求确定可接受的安全水平,其定义为目标安全水平 $P_{f, target}$,即最大可接受失效概率。

当没有更特殊的要求时,附录 C 包括了确定目标安全水平的导则并给出了可用的取值。这些值是从对其他规范和标准中的结果进行校验后得来的。使用者应确认由附录 C 中得到的值是可以应用于特定情况的。

10 失效模式

10.1 概述

在管道寿命周期的所有阶段(设计、施工、运行和再评定),应考虑所有的载荷效应和相关的损害,包括:

- 内部压力载荷效应;
- 外部压力载荷效应;
- 轴向载荷效应;
- 第三方活动导致的损害;
- 上述效应的组合。

10.2 内部压力导致的失效模式

内部压力载荷分为下列 3 种类型:

- a) 试压压力(压力试验时);
- b) 偶然压力;
- c) 正常的运行压力波动。

内压主要导致拉伸环向应力。由试压或最大偶然压力引起的环向应力能导致几种过载失效模式,即:材料过度屈服、延性撕裂或最终破裂/断裂。压力变化引起的环向应力会导致疲劳裂纹扩展。

因此,应识别下列行为:

- 屈服;
- 爆裂;
- 裂纹扩展后的断裂。

屈服通常是一种 SLS,因其一般在容纳流体时不导致即刻的最终失效。爆裂定义为管壁发生不可控制撕裂的那一刻,其导致最终管子破裂,是一种 ULS。对于腐蚀的管子,应使用减薄的壁厚来计算爆裂强度。

当断裂由环向拉伸应力引起时,此处断裂是指焊缝缺陷的不稳定断裂和/或塑性失稳。这是一种 ULS 情况。在断裂评估中应包括在试压期间可能发生的延性撕裂和由运行压力波动引起的疲劳。因此,通常需要综合评估疲劳和断裂。

10.3 外部压力导致的失效模式

作用于海洋管道的外部水压,作用于陆上管道的外部土壤载荷(包括穿越道路和铁路导致的车辆载荷)和浮力引起的环向压应力,都能导致下述的管道失效:

- 管截面的椭圆化；
- 管截面的失稳，局部屈曲；
- 屈曲扩展(仅在海洋管道上)。

由于管段的过度椭圆化可能影响清管操作，所以它是一种 SLS。失稳是一种 ULS。与海洋管道相关的屈曲扩展与损害条件有关，因而是一种 ALS。

10.4 外部载荷效应导致的失效模式

外部载荷和载荷效应包括：

- 热效应；
- 外部和内部压力；
- 弯矩；
- 轴向力(由内部/外部压力，被约束的热膨胀和收缩，地层运动和外力引起的)；
- 流体动力学力；
- 外部土壤载荷；
- 浮力；
- 土壤/地层运动引起的横向载荷。

这些效应引起管壁的压缩或拉伸应力(和应变)，可引起由下列极限状态描述的失效：

- a) 在总压缩载荷下的屈曲；
- b) 在总拉伸载荷下的环焊缝断裂，表示为与不稳定断裂或塑性失稳相互作用；
- c) 在弯曲作用下截面的椭圆化；
- d) 疲劳。

其中屈曲和断裂属于 ULS，而椭圆化属于 SLS。失效总是与最大载荷效应或低的承受能力联系在一起。FLS 通常由周期性的“非极端的”纵向载荷效应引起，如管道处于悬跨的情形。

10.5 第三方活动导致的失效

冲击载荷分类为：

- a) 来自如作业、安装和捕鱼活动(对于海洋管道)的正常冲击载荷；
- b) 来自下述情况的偶然载荷：对于海洋管道，如抛锚、下落物体和容器；对于陆上管道，如来自挖掘机的冲击或其他第三方的行为。

冲击载荷效应可以引起：

- 混凝土和被动保护结构受损；
- 钢管上的永久的凹坑；
- 钢管表面的划痕；
- 管段的破裂或失稳；
- 管壁的穿孔。

严重的涂层损伤可构成一种 SLS。除了可能的清管问题(SLS)外，永久凹坑还可能导致局部应力集中。与划痕、破裂和失稳相关的模式属于 ULS 或 ALS，取决于相关影响状况发生的频率。

10.6 腐蚀环境导致的失效模式

所输送的腐蚀性流体(酸性油、酸性气、氨气等)或者外部环境(土壤、海水等)可以诱发管道上不同类型的腐蚀现象(全面腐蚀、点状腐蚀等)。

造成金属损失的腐蚀现象可引起：

- a) 流体损失；

b) 管壁变薄引起的机械失效。

腐蚀环境与应力(包括恒应力和变应力)的组合会因下列原因诱导裂纹成核和扩展:

- 应力腐蚀开裂(SCC);
- 腐蚀或应力腐蚀疲劳。

SCC 的发生需要一种敏感合金暴露于特定的环境中并且应力高于某些极限值。由于 SCC 仅以包含众多足够长的单个裂纹簇的形式存在,它并非是一种普遍现象,可以在具体问题具体分析的基础上当作一种 ALS 考虑。

全面或点状腐蚀可使疲劳成核。

10.7 组合载荷导致的失效

管道通常同时承受多种载荷作用。载荷组合可导致与单一载荷效应关联的失效模式的相互作用或者其他的失效模式。载荷组合可以导致下列临界极限状态:

- 在外部压力和冲击载荷作用下的失稳(由于损伤);
- 在内部压力和冲击载荷作用下的破裂(由于损伤);
- 在外部压力、弯曲和轴向载荷作用下的屈曲和失稳的相互作用;
- 在内部压力、弯曲和轴向载荷作用下的屈曲。

正如以上讨论的,当仅存在一种载荷时,上述每一种极限状态也可以是相关的。然而载荷组合效应使得相关极限状态比其中任一载荷单独作用时临界程度更高。因此,这些载荷组合通常决定局部设计的校核。

11 管道运行管理

11.1 一般要求

在第 11 章中论述按照基于可靠性的极限状态方法设计的管道完整性管理系统所包含的运行要求。

管道可靠性对设计期间所做的种种假设是敏感的,因而在管道运行期间确保不违反这些假设是重要的。

应规定适当的监测、试验、检查和审查方法,以确保不超过所要求的极限状态。

管道的完整性管理系统应包括:

- 管理机构、角色和责任;
- 运行规程;
- 文件管理和记录;
- 完整性管理和监测;
- 管道安全、健康和环境。

11.2 运行管理规程

完整性管理和监测的一项重要内容是效能评估。分析管道完整性状况的连续记录,可以了解管道针对设计期间识别的每种失效机理(极限状态)的易损性的变化情况,并且使得可能采取足够的减缓措施来阻止失效。

在管道运行期间,对于所有相关极限状态应将主要运行参数保持在规定的极限范围内。在寿命期内载荷和抗力的变化与极限状态准则发生冲突时,要求开展运行和完整性管理来检查和监测关键的管道参数和性能。监测的规程宜包括下列相关项目:

- 监测运行数据,如压力、温度、油品组分和状态、流量以及停运和/或跳闸的次数,或者油井产品的组分以确保没有超出设计条件;

- 外部和/或内部的(如通过智能清管)腐蚀监测;
- 监测流体物理参数,并取样对腐蚀性成分、缓蚀剂或腐蚀产物进行化学分析;
- 用于定期或在线监测腐蚀速率的失重测试挂片或其他可取出的探针;
- 通过在管道合适位置处安装的临时性或永久性设备现场测量壁厚;
- 阴极保护参数的监测;
- 滑坡监测;
- 目视检测,如凹痕定位,或监测海洋生物;
- 中心线偏离检查,如使用管道地理定位检测器校核由冻胀或土壤运动导致的偏离直线性;
- 使用加速度计监测平台立管的位移(海洋管道),或者使用光纤监测立管的应变。

管道完整性管理系统定义了监视和检测的要求,以及根据检测结果而采取的行动,如:维护活动、修理、停运或改变检测和监视的频率。

为评估管道运行期间的技术完整性,可以采用先进的数值计算和建模/监测方法(直接评价)作为其他检测方法(如智能清管)的补充和(或)备选方案。

管道的可靠性和失效后果依赖运行管理和监测工作。应将与运行管理相关的任何假设、监测和补救措施(如降级使用、停输和(或)修理)的启动条件清晰地写入文件。

应定期重新审查和更新完整性管理系统以考查管道的任何功能劣化或其他变化。一旦运行状态相对于设计条件发生了变化,或者由于功能退化或外部影响导致关键设计参数达到其耐受极限,就应进行管道的再评定。

再评定宜使用更新至适合反映公认的当前实际的最初极限状态,以及任何根据变化的影响可能引入的新极限状态。

当出现下列情况时应再评定管道的完整性:

- 初始设计寿命超期或需要延伸,即服役寿命延长;
- 管道已经退化或者严重受损,如:腐蚀/侵蚀和焊缝缺陷,凹坑,对腐蚀保护(阳极,防腐涂层)的破坏以及由跨越或不稳定性引起的累积疲劳损伤等;
- 运行条件已经变化或者管道需要升级使用,如:压力、温度,腐蚀性等;
- 原始设计准则或设计基础不再有效,如:环境载荷、变形、冲刷作用等设计条件的变化等等。

应进行检查以保证仍然满足设计要求、没有损害发生并监测管道状况的任何变化。宜检查在设计中识别的、却未在运行控制系统中得到常规监测的关键参数或影响因素,以保证其仍保持在允许的设定范围内。检查方法应至少说明下列内容:

- a) 如果设计、法规要求或其他特殊要求需要,应检查露管和埋深情况;
- b) 自由跨越的特性;
- c) 在施工期间或作为补救作业中安装的限制自由跨越的人工支撑状况;
- d) 局部海床冲刷;
- e) 影响管道完整性的沉降或沙丘移动;
- f) 包括膨胀效应在内的管子的过度移动;
- g) 拱起或侧向屈曲的位置和特性;
- h) 法兰和机械连接的完整性;
- i) 海底阀门和保护结构的完整性;
- j) Y型和T型连接及保护结构;
- k) 管道保护结构的完整性;
- l) 外部腐蚀防护系统的性能;
- m) 内外腐蚀及冲刷;
- n) 对管子、涂层和阳极的机械损伤;

- o) 在管道附近区域的大的垃圾和碎石;
- p) 泄漏;
- q) 抛锚及其他管道约束物的存在证明。

对平台立管(对于海洋管道)的检查应包括在长期的检测计划中,特别注意下列要素:

- 由管道运动引起的立管位移;
- 涂层损伤;
- 海洋生物分布范围;
- 支撑和导引机构的完整性和功能性;
- 容器保护结构的完整性和功能性;
- 立管和支撑的外部腐蚀;
- 内部冲蚀和腐蚀。

在管道进入完全运行状态并在投产后一年内,宜尽早实施第一次外部检查。

宜进行风险评价以确定管道寿命期内进行内外检测的合适频率。该评价考虑的内容宜包括:设计、制造和安装数据、管道性能退化机理和失效模式、检测系统的范围和精度。宜定期审查检查频次,考虑以前检查的结论、运行参数的变化以及详细的修补工作。

附录 A

(资料性附录)

不确定性和可靠性分析——方法描述

A.1 概述

在结构可靠性分析中,开展不确定性分析是其中最重要和基础的任务之一。在管道寿命期内的设计、施工、投产和运行阶段,都存在不确定性;事实上,管道寿命本身也是不确定的。原则上,与上述各阶段关联的所有物理量和行为都具有不确定性并且其中每个对管道的结构可靠性都有贡献。不确定性的程度及对管道结构可靠性的相关影响,依赖所考虑的物理量或行为以及用以描述这些量或行为的可用数据的数量。

在本附录中,识别和讨论了大量能够影响管道可靠性的物理参数和行为。对这些物理参数或行为对管道可靠性的影响、必需的数据数量和类型,以及宜如何收集和分析这些数据的方法,给出了相关指南。特别是,详细说明了与管道几何尺寸、材料、施工、投产、运行和环境影响及危害相关的不确定性内容。在详细叙述这些特定量之前,首先描述一下不确定性的本质。然后,描述可靠性分析的基本方法和计算程序。

A.2 不确定性分类

A.2.1 一般要求

与管道实际应用相关的不确定性主要可以分为以下两组:

- a) 本质或内在的不确定性;
- b) 认知的不确定性,包括:
 - 测量不确定性;
 - 统计不确定性;
 - 模型不确定性。

对不确定性来源的分类通常这就足够了,但存在所引用类型之间的过渡类型。而且,与过失误差相关的不确定性一般不包括在结构可靠性的框架内并且宜通过其他方式考虑。

A.2.2 本质不确定性

本质或内在不确定性,也称为固有不确定性,是一个自然概率量。它又可被细分为两类:

- 能被人为因素影响的不确定性;
- 不能被人为因素影响的不确定性。

第一类的例子是:与钢的强度或几何量的公差有关的不确定性,它们可以通过使用更先进的生产方法或质量控制系统得到降低。第二类的例子是:从大量的代表性数据组中估计得来的环境载荷的本质上的可变性。

A.2.3 测量不确定性

当观察一个量时,仪器的缺陷和样品的干扰导致测量的不确定性。这种不确定性通常由生产商定

量给出,也可以通过实验室或全尺寸试验来评价。其可以通过使用系统误差(偏差)和随机误差(精度)根据准确度来描述。如果所考虑的量不是从测量直接得到的,而是通过估计(如数据处理),取得的,那么要将模型和测量的不确定性组合应用。

A.2.4 统计不确定性

统计的不确定性来源于信息量有限,即:有限的观察次数,其导致在估计统计参数时的不确定性。

在描述某特定参数时几乎没有可用数据的情况下,有可能可以基于其他的信息和使用 Bayesian 统计方法改进对参数不确定性的估计。例如,可以基于压力试验后得到的信息提高对屈服强度和壁厚的不确定性的认识。

A.2.5 模型不确定性

模型的不确定性是在采用物理和概率模型时由不完善和理想化导致的,并反映了在应用模型描述“真实世界”时的总体置信度。其可进一步解释不包含在模型中的其他变量及其相互作用的未知效应。

表示载荷或抗力数量的物理模型中的模型不确定性可以通过一个随机因子来描述,该因子定义为“真实世界”中真实的数量与模型描述的数量之间的比值。一个不等于 1.0 的均值表示模型预测结果真实性的偏差,该系数的变化反映相应预测结果的变化性。

对于承压公式,模型不确定性通常用于反映解析方程(或有限元模型)在描述真实世界状况的能力上的置信度。为了评价这种方法的充分性和置信度,可以进行大量的评价和验证,如使用有限元法或开展实验室试验。

对于载荷或载荷效应的建模情况,模型的不确定性可与分布规律的选择、测试时间的确定、所采用的分布规律拟合程序和来自外推法的未说明的尾部行为等有关。

由多组室内或现场测量数据、物理推理、精细的分析或可靠的工程判断得到的对模型不确定性的充分评估是适用的。不过,对模型不确定性分布规律的主观选择通常是必要的。

A.3 概率分布的确定

A.3.1 概述

随机变量的概率分布代表该变量的不确定性。可靠性的分析结果可能对所采用的概率分布的尾部行为非常敏感,所以采取正确的程序选择分布是必要的。

对一个随机变量建立概率分布的过程,被称作统计推理,包括下列步骤:

- 选择分布模型;
- 估计分布参数;
- 验证拟合的分布。

A.3.2 分布模型的选择

宜基于来自类似问题的经验、物理推理或分析结果,为特定的随机变量选择适合的概率分布函数的数学表达方式。

或者,可以基于对经验数据拟合很好的分布规律进行选择。当有大量数据可用时,可以使用相关方法来估计偏度和峰度系数以选择一类合适的模型并剔除不适用的模型。

与管道问题相关的最常用的一些分布包括:

- a) 描述有界变量分布的 beta 分布;

- b) 信息有限时描述抗力变量的对数正态分布；
- c) 描述线性物理参数和附加独立误差的正态分布；
- d) 描述如电流定向分布等物理现象的均匀分布；
- e) 描述长期波高和电流值的 Weibull 分布(著名的指数及 Rayleigh 分布是 Weibull 分布的特例)；
- f) Gumbel 分布描述总体分布为指数类型的变量的极值。

为评价某分布是否可看作是对某著名随机实验的近似,宜考虑下列产生机理,例如:

- 加法机理导致正态分布(中心极限定理)；
- 乘法机理导致对数正态分布；
- 极值通过 I、II、III 型的渐进分布描述,即用以描述最小和最大值的分布；
- 用 Poisson 和 Gamma 分布描述 Poisson 过程。

n 次幂的极值分布用以描述包含 n 个总体分布为 $F_x(x)$ 的独立和一致分布变量的样本中的最小和最大值。式(A.1)~式(A.2)给出了最大和最小值的分布函数。

$$F_{\max}(x) = [F_x(x)]^n \dots\dots\dots (A.1)$$

$$F_{\min}(x) = 1 - [1 - F_x(x)]^n \dots\dots\dots (A.2)$$

当采用具有大量可调节参数的灵活的分布模型(如 Hermite 或广义 Gamma 分布)时,如果模型是在有限数量的样本数据的基础上选择的,则要特别小心。

A.3.3 分布参数的估计方法

A.3.3.1 图表方法

可使用工程判断或目测拟合方法从图中估计分布参数。

A.3.3.2 最小二乘法拟合方法

可通过计算 $\sum (x_{i,obs} - x_{i,model})^2$ 的最小值得到分布参数,其中 $x_{i,obs}$ 是观察量,而 $x_{i,model}$ 是相应分布模型预测结果。该方法对应于依赖分布类型的线性或非线性优化问题。

A.3.3.3 最大似然估计技术

对于与数据组量有限的分布参数相关的统计不确定性估计可以采用此技术获得结果,其得出渐近无偏估计量。当极值分布尾部行为次要时,对于大量单一人口样本该技术是适合的。

A.3.3.4 矩方法

可以采用矩方法,通过将解析矩赋给样本矩来评价分布参数。通常估计 4 种矩估计量——均值(μ)、标准差(σ)、偏度(δ)和峰度(K)。对于包含 n 个测量值($x_1, \dots, x_n$)的样本,按式(A.3)~式(A.6)计算这些估计量:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots (A.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\delta = \frac{\frac{n}{(n-1)(n-3)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \dots\dots\dots (A.5)$$

$$K = \frac{\frac{n^2 - 2n + 3}{(n-1)(n-3)(n-5)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4}{\sigma^4} + \frac{3(n-1)(2n-3)}{n(n-2)(n-3)} \dots\dots\dots (A.6)$$

A.3.3.5 Bayes 估计方法

当更多的信息量可用时,使用 Bayes 估计技术能够使与分布参数估计相关的不确定性得到不断修正。在选择分布或分布参数值时,当可用的统计信息有限并且工程判断、直觉或经验有强烈的指向时,推荐使用该方法。

A.3.4 分布的验证

选择分布过程中的最后阶段是模型的验证。通过客观方法或主观判断可以指出拟合模型的适用性。最常用的客观方法(参见参考文献[8])有:

- Kolmogorov-Smirnov 检验;
- χ^2 检验(χ 平方检验)。

这些经典统计方法用来检查是否有证据剔除候选的分布。特别是当可用数据很少时,缺乏剔除候选分布的证据不一定意味着该分布是正确的。因而,基于概率图表的工程判断通常是首选的方法。此类验证方法这样来实现:将经验和拟合的分布函数画在一张分位数图上或者一张构建为拟合模型能够以直线形式出现的图上。接下来可以重点验证分布的重要部分(分布的左右尾部或中心部分)。

A.4 统计不确定性的评估

A.4.1 概述

统计的不确定性是所拟合的分布类型、估计技术、分布参数的取值以及下列数据的数量的函数。这种不确定性意味着可以使用参数化模拟技术(参见参考文献[1])、最大似然方法、最小二乘法线性回归法或经验给出的近似方法。

A.4.2 参数化模拟技术

参数化模拟技术的程序如下:

- a) 通过拟合一组中 n 个观察值的方法确定一组参数值(使用 A.3.3 中介绍的技术之一);
- b) 将这些参数值作为真实的总体参数,并产生总体分布的 n 个结果的 N 个样本;
- c) 对每一样本,用拟合方法估计新的参数组;
- d) 从 N 个实际值中估计出分布参数的统计值,如 4 个低阶矩和相关系数;
- e) 通过将分布赋给参数实现分布的随机化。

另外,可使用 Monte Carlo 法从 N 个样本中生成包括统计不确定性的新分布(连续或极值分布)。

A.4.3 近似评估

对于独立的分布样本,矩估计量的标准差如式(A.7)~式(A.10)给出:

$$s_{\mu} = \sigma / \sqrt{n} \dots\dots\dots (A.7)$$

$$s_{\sigma} = \sigma \sqrt{\frac{K-1}{4n}} \dots\dots\dots (A.8)$$

$$s_s = \sqrt{6/n} \dots\dots\dots (A.9)$$

$$s_K = \sqrt{24/n} \quad \dots\dots\dots (\text{A.10})$$

式中 μ 、 σ 、 δ 和 K 已在前面定义。前两个表达式是普遍有效的,后两个表达式仅对正态样本有效,但在非正态情况下可作为近似算法。

A.4.4 Bayesian 方法

在考虑(如正态的)包括大量分布参数(如正态随机变量的均值和标准差)情况时,Bayesian 方法同样是基于对随机变量的分布函数的假设形式的。不过在这种情况下,分布参数的概率分布是使用合适的统计数据明确计算的。这些概率分布接下来用在后续分析中以说明统计的不确定性。其包括以下步骤:

- 基于除了后续使用的统计数据以外的任何信息,为分布参数估计一个先验的概率密度函数。如果没有先验知识,可以使用非资料性的先验值(概率密度对其是常数)。
- 使用 Bayesian 方法,获得可用统计数据给出的分布参数的概率分布,其被称作后验分布。
- 通过考虑分布参数所有不同的可能值,和通过步骤 b) 中得到的后验分布函数描述它们的相关似然性,计算该情况下随机变量的预测分布。
- 在后续的 SRA 中使用所考虑的随机变量的预测分布。

A.4.5 不确定性的组合

令 $f(x)$ 是一组随机变量的函数。如果 x 的各分量是独立的,那么函数 $f(x)$ 的方差可近似表示为式(A.11):

$$\sigma_f^2 = \sum \left[\frac{\partial f(X=x_0)}{\partial x_i} \right]^2 \sigma_{x_i}^2 \quad \dots\dots\dots (\text{A.11})$$

式中:

σ_{x_i} 为第 i 个不确定性源的标准差。

如果 $f(x)$ 接近线性,其可以提供对组合不确定性的可接受的度量。

使用上述简单的公式可以将不确定性(如:本质不确定性,测量不确定性的几种来源和统计不确定性)的各元素组合起来。

A.5 变量的联合描述

在可靠性分析中,宜考虑所有显著的变量。如果变量是独立的,通过边缘分布结果得到变量的联合描述(即联合分布)。然而,在多数情况下所涉及的一些变量是互相依赖的。对于两个相依变量 x 和 y 的情形,通过引入式(A.12)定义的相关系数 ρ ,可以将这种影响包括在分析中。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \mu_x \mu_y}{(n-1) \sigma_x \sigma_y} \quad \dots\dots\dots (\text{A.12})$$

如在图 A.1 中给出的,相关系数指下列关系:

- 若 $\rho=1$,完全正相关;
- 若 $\rho=-1$,完全负相关;
- 若 $0<\rho<1$,正相关;
- 若 $-1<\rho<0$,负相关;
- 若 $\rho=0$,不相关。

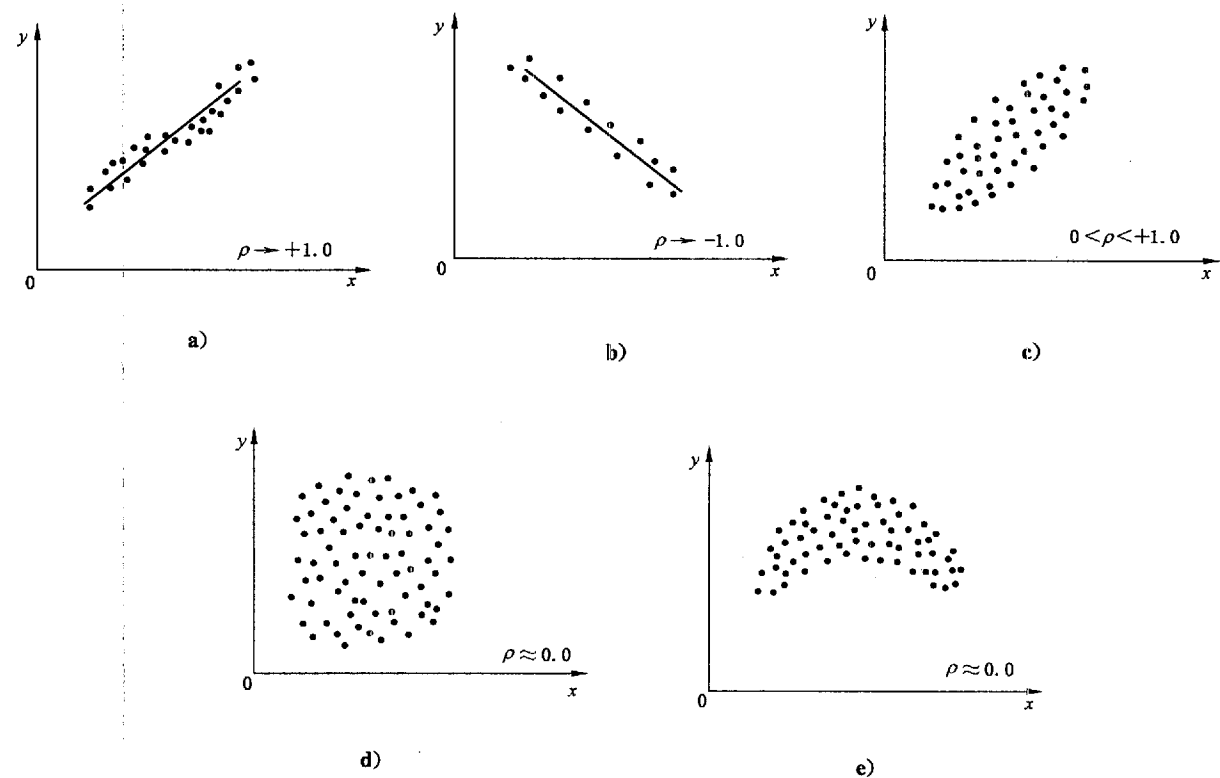


图 A.1 相关系数图示

通常,要用到下列分类:

- 若 $|\rho| \geq 0.9$, 则强(高度)相关;
- 若 $0.5 \leq |\rho| < 0.9$, 则中等(中度)相关;
- 若 $|\rho| < 0.5$, 则弱(低度)相关。

如果有下列情况,变量间的相互依赖性可以忽略:

- a) 变量是弱相关的;
- b) 依赖性存在于重要性不高因素的变量间;
- c) 省略变量间依赖性保守的。

A.6 典型的不确定性度量

A.6.1 一般要求

在管道的概率设计中,要对描述下列情况的变量进行不确定性度量:

- 管线管性能;
- 载荷和载荷效应;
- 外部第三方影响;
- 施工缺陷;
- 腐蚀。

A.6.2 管线管性能

管线管性能,包括尺寸和材料强度参数,取决于管子种类(如无缝的或焊接的)、材料类型(如碳钢或双相钢)和生产规格。这类性能与所有极限状态相关并用于海洋和陆上管道。它们不确定性的度量由

工厂数据的统计分析得到。在附录 B 中,包括了下列参数:

- 壁厚;
- 管径;
- 管子椭圆度;
- 屈服强度;
- 最终抗拉强度;
- V 形缺口夏比冲击功;
- 临界 CTOD;
- S-N 曲线和裂纹疲劳扩展参数。

壁厚对大多数失效模式(包括外部干扰和腐蚀)有影响。典型的是引用一个公称值,即使该值没有精确的统计解释,通常也是一个合理的均值近似。

屈服强度 σ_y , 名义上由 SMYS 表征。屈服强度具有测量、统计和本质不确定性, SMYS 值代表描述本质不确定性的概率密度函数中百分比较低的部分(1~5)。(通常不知道 SMYS 精确的统计显著性。)

可由管子出厂证书建立壁厚和屈服强度的概率密度函数。概率密度函数通常可通过由均值和标准差的计算估计值表征的正态或对数正态分布来表达。这些统计的置信度界限依赖于数据的量和变化性;数据量大,置信度就高。然而,在可用数据非常少的情况下,基于静水压力试验得到的数据采用 Bayesian 统计方法更新分布可显著提高壁厚分布的置信度。

最终拉伸强度 σ_u , 名义上由规定的最小抗拉强度(SMTS)表征。与管道失效模式相关的极限状态函数通常通过隐含或明确地对屈服强度应用一个因子(Y/T 比值)来说明抗拉强度的影响。

通常使用材料韧性确定对初始裂纹(脆性或韧性的)和裂纹扩展的抗力。

对初始裂纹抗力的最好描述是使用断裂力学的韧性性能,如 CTOD 的概念。

通常采用 V 型缺口夏比冲击试验结合落锤撕裂试验(DWT)的结果描述裂纹扩展抗力或止裂能力。对冲击功的最低要求参见参考文献[2]或[30]。由于 DWT 能正确预测管线管材料的韧脆转变温度,DWT 试验结果可以表明韧性断裂行为(参见参考文献[3]和[4])。

A.6.3 载荷和载荷效应

管道经受各种外部载荷,包括:外部静水压力、地层运动、海流、自由悬跨的自重效应以及海洋拖网线引起的载荷。

载荷和载荷效应的不确定性是针对具体情况的。然而,对每类载荷和载荷效应(功能或环境的),通过解析分析或数值模拟方法可以找出典型情形下的载荷的变化范围。

海洋管道相关的载荷性能参见附录 B 中以下内容:

- 内压;
- 与安装和铺管有关的功能载荷效应;
- 与安装和铺管有关的环境载荷效应。

A.6.4 外部影响

从历史上看,来自挖掘机的冲击是导致陆上管道发生失效频率最高的原因。冲击往往导致带有冲击凿沟的凹坑。凹坑的深度 d_d 、凿沟的长度 L 、凿沟的深度 d 和冲击发生的频率 f_{imp} 都具有不确定性。除非能表明所考虑的管道没有或将来也不会受到这类冲击的影响,那么量化这 4 个参数的不确定性就很重要。

对于涉及现存管道的情况,描述不确定性的数据库可能已经由管道运营者或其代表由检测记录而构建起来了。

当考虑新管道的设计时,如果能够表明新建管道将不会经受比已有管道更复杂的环境时,则可使用

现有的数据库。当上述情况不确定或无数据可用时,应对不确定性做适当的保守估计。

对于结构可靠性分析,通常取 f_{imp} 的一个确定性最佳估值就足够了。

Weibull 分布通常用来描述危害的物理尺度的不确定性。通过将 d_a 、 L 和 d 等量画在 Weibull 图上,直观检查数据的线性程度,可很容易确定这种分布的适用性。

A. 6.5 施工缺陷

任何在寿命开始时就存在的环焊缝或焊缝缺陷都会由于疲劳裂纹扩展而增大尺寸。因而,除非知道管道没有或将来也不会遭受任何显著的周期性载荷,考虑焊缝和环焊缝缺陷对结构可靠性的影响都是必要的。在这种情况下,本质、统计、测量和模型的(扩展规律)不确定性都存在。可接受的管线管环焊缝缺陷尺寸可根据参考文献[5]中的方法进行评估。

从寿命开始就可能存在的缺陷的类型、大小和数量依赖于如下因素,如焊接技术、焊接参数、缺陷取向、焊接检测技术的可靠性和精度、静水压力试验压力以及焊缝的强度和韧性等。如果检测数据可用,那么有可能从寿命之初,直接从这些记录中就可以建立描述缺陷长度 $[L(0)]$ 和深度 $[d(0)]$ 不确定性的分布。基于管道经静水压力试验后获得的更多信息可改进(统计式更新)该分布。

当难以获得检测记录时(通常是这种情况),一种方法是基于静水压力试验得到的数据以及焊缝强度和韧性的已知分布来构建 $L(0)$ 和 $d(0)$ 的分布。这种情况下,假设 $L(0)$ 的分布、确定 $d(0)$ 的分布,反之亦可。

重点要注意的是所获得的分布是寿命起始时的分布。由于疲劳裂纹扩展是一个时间相关过程,因而将这些分布或失效空间(极限状态函数)进行适当的时间相关转换是重要的。

A. 6.6 腐蚀

包括内、外和应力腐蚀开裂在内的各类腐蚀,都影响管道的结构可靠性。各类外腐蚀的发生,一定存在外涂层的开裂和开裂附近阴极保护系统的失效。腐蚀缺陷的扩展速率主要依赖于局部环境条件并会依赖于时间。因此,任何时间 t ,已有缺陷的数量 $n(t)$ 以及每个缺陷的长度 $L(t)$ 、深度 $d(t)$ 以及扩展速率 $[r(t)]$ 都存在相当的不确定性。

当目标管道有多年大量检查记录可用时,即可建立描述给定时间内腐蚀缺陷大小变化的分布。按照适当标准进行的修理对这些分布的影响也可以考虑进去。

当难以获得检测记录时,可使用从类似管道的检查中得来的数据。以时间相关性参数表征的 Weibull 分布可用来描述 $L(t)$ 和 $d(t)$ 的不确定性。已有缺陷的数目依赖于腐蚀发生的速率和修理的准则。

A. 7 可靠性分析

可靠性分析有两个主要的应用:

——完全的概率设计校核(SRA),即:明确计算出失效概率并按 $P_{f,target}$ 的验收准则校核。

——同所选的 LRFD 格式一起采用分项设计系数的校准,即:发展 LRFD 格式并确定安全系数。

对于一种给定的极限状态,概率设计包括广义随机载荷(S)和广义随机抗力(R)的建模。作为一种简单的描述,相应的极限状态函数可表达为式(A. 13):

$$g(x) = R - S \quad \dots\dots\dots (A. 13)$$

当通过不确定性分析建立了 R 和 S 的分布函数后,可以按式(A. 14)计算失效概率:

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_{R,S}(R, S) dR dS \quad \dots\dots\dots (A. 14)$$

接着使用设计公式(A. 15)校核概率设计:

$$P_{f, \text{calculated}} \leq P_{f, \text{target}} \quad \dots\dots\dots (\text{A. 15})$$

式中:

$P_{f, \text{calculated}}$ ——由可靠性分析计算出的失效概率;

$P_{f, \text{target}}$ ——对于被接受的设计宜满足的目标值。

概率(或基于可靠性的)设计方法包括下列步骤:

- 所有相关失效模式(即极限状态)和极限状态方程的识别;
- 引入极限状态方程中的变量的不确定性建模;
- 目标安全水平的确定(以下给出建议);
- 每种极限状态的失效概率计算;
- 与可接受失效概率或经校准的设计系数(确定的参数)比较以获得目标安全水平。

该过程中最后三步的相关导则参见附录 C。导则中同时给出了如何利用概率计算程序校正 LRFD 格式中的分项安全系数的方法。

A. 8 可靠性计算方法

A. 8.1 失效概率的计算方法

管道的失效概率 P_f , 按式(A. 16)计算:

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x) dx \quad \dots\dots\dots (\text{A. 16})$$

式中:

x ——随机变量向量;

$f_x(x)$ ——联合概率密度函数;

$g(x)$ ——极限状态函数, 当 $g(x) \leq 0$ 表明失效显著。

函数 $g(x)$ 可以代表单一失效原因, 即单一事件函数, 或几种失效模式的综合表示。以上积分只有少数解析解存在, 且由于一般可靠性应用中出现的随机变量数目巨大, 传统的数值积分方法非常耗时耗力。可通过下列补充方法得到失效概率的估计结果:

- 近似的解析方法;
- Monte Carlo 模拟方法;
- 嵌套式可靠性方法。

在过去 20 年里, 结构可靠性的理论和方法已经得到了显著的发展。在理念、概念以及计算方法上已经进行了深入的研究, 目前该领域已经达到这样一个阶段: 改进的方法正在得到广泛的应用。结构可靠性理论的方法和应用连同大量研究该主题的论文已经写入越来越多的教科书中, 如参考文献[6]~[11]。已有大量的分析工具存在并在公开市场上可以得到。

A. 8.2 近似解析方法

近似解析方法包括所谓的一级可靠性方法(FORM)和二级可靠性方法(SORM)。基于解析近似方法的基本方法是将随机变量转化为概率空间内标准化的、相互独立的正态变量, 并通过简化积分区间的边界近似求出概率积分。

这些方法由渐进分析作为支撑并且对于工程上经常遇到的高可靠性问题特别有用。通过使用关于设计点的失效函数的一级(FORM)或二级(SORM)泰勒展开替换积分区间的真实边界, 经常能获得对于失效概率的很好的近似结果。进行 FORM 和 SORM 分析要求的条件是 $g(x)$ 在设计点附近二次连续可导。

由于某些情况下计算失效平面内的点非常费力, 如对于正则空间内的每个迭代都需要一个新的费

时的有限元分析,因此促进了简化方法的采用。建立能使 $g(x)$ 计算次数保持最少的方法是重要的。还宜提到的是,在一些情况下迭代的次数可以通过使用响应面技术而得到降低。

A. 8.3 Monte Carlo 模拟方法

Monte Carlo 模拟方法从联合分布 $f_x(x)$ 中抽取样本,在每个样本点评价指示函数 $I(x)$,其定义为:当 $g(x) \leq 0$ 时, $I(x)=1$;当 $g(x) > 0$ 时, $I(x)=0$ 。通过式(A. 17)计算样本均值给出失效概率的无偏估计量:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i) \quad \dots\dots\dots (A. 17)$$

该方法的优点是只用到 $g(x)$ 的节点值,不需要 $g(x)$ 及其分布的任何解析性质。缺点是概率小时的计算时间问题。通过使用下列更先进的模拟(抽样)技术可得到改进效率的模拟方法:

- 重要性抽样;
- 拉丁超立方抽样;
- 自适应抽样;
- 条件模拟方法;
- 定向模拟;
- 轴线正交模拟。

A. 8.4 嵌套可靠性方法

在下列情况下的极限状态函数的可靠性计算中,需使用嵌套可靠性方法:

- 时间相关变量以时间无关变量为条件;
- 首次穿越失效事件与不确定失效平面的随机过程异交;
- 确定由主观不确定性导致的失效概率分布;
- 可微分和不可微分变量的分离。不可微分变量(如:离散变量)要求通过模拟技术分析,而 FORM/SORM 分析可作为整个变量向量的一个子集来运用。

在时间相关性问题中,重点研究随机向量过程(如载荷过程)在时间区间 $[0, T]$ 上至少离开安全区域一次的概率情况。对于只有一个载荷的情况,在时间区间上的最大极端载荷可作为给定(极值)分布函数的随机变量建模。对于存在几个时间相关载荷过程的情况,通常不知道极值分布,对确定首次穿越失效概率有用的概念是安全区域中向量过程异交结果的平均速率。

安全域本身也可能是时间相关的,如疲劳、裂纹扩展、蠕变、腐蚀或磨损等损伤导致的结构退化。结构失效可定义为损伤指示第一次达到临界值的事件。

在许多情况下,可通过采用式(A. 18)计算独立失效面相交的 Poisson 假设近似给出首次穿越失效概率,如对于高阈值、窄带不严重的过程:

$$P_f = E_x[P_f(x)] \quad \dots\dots\dots (A. 18)$$

其中 $E[\]$ 是期望值运算,并且:

$$P_f(x) \approx 1 - \exp\left[-\int_0^T v(t, x) dt\right] = 1 - \exp[-v(x)T] \quad \dots\dots\dots (A. 19)$$

其中式(A. 19)对于静态条件是有效的。可计算条件平均交叉率 $v(t, x)$ 作为并行系统的特殊参量化灵敏度因子。

A. 8.5 可靠性更新

管道设计阶段的可靠性评估是基于可用的先验信息上的。稍后阶段评估管道的可靠性时,施工或运行阶段可用的新信息有助于对结构性能的更好评估或降低主观不确定性。

通过令事件裕量 $H(x) < 0$ 来用公式表达新信息。利用 Bayes 理论,从而可以得到更新后的失效概率:

$$P[g(x) \leq 0 | H(x) \leq 0] = \frac{P[g(x) \leq 0 \cap H(x) \leq 0]}{P[H(x) \leq 0]} \dots\dots\dots (A.20)$$

其对应于并行系统失效概率和单一事件失效概率间的比值。“在工厂试验期间没有爆裂”可作为 $H(x) \leq 0$ 的例子。同时可通过定义 $g(x) = z - Z$ 来更新变量 Z 的分布函数。或者,可以使用利用共轭分布或模拟技术的更传统的 Bayesian 分布更新方法。

A.8.6 系统可靠性

按照概率的观点,管道是一个串联系统,即:如果它的任何一个元件(管段或接头)失效,管道就失效了。因此,在元件的可靠性和系统的可靠性间建立关系是重要的。

对于由失效关系一致的部件组成的串联系统,系统的失效概率 $P_{f,sys}$ 可用式(A.21)表示:

$$P_{f,sys} = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\beta_i - \sqrt{\rho}x}{\sqrt{1-\rho}}\right) dx \dots\dots\dots (A.21)$$

式中:

n ——系统中元件的个数;

β_i ——失效元件 i 的可靠性指标;

ρ ——任何一对元件 i 和 j ($i \neq j$) 的安全裕量之间的共同相关系数。

可由从元件可靠性分析得到的失效模式的物理机理、材料性能和重要性因子估计出相关系数的近似值。如果失效元件的数目有限,做出选择一合适的相关系数的假设可能不是关键的,并可证明“等相关系统方法”是可行的。

另外,可应用极值方法。基本假设是系统的失效可被限制在单一的关键元件内,这种关键元件的定义依赖于问题的物理本质和所考虑到极限状态函数。对于管道,关键元件通常是特定地区的、与极低承压能力或遭受极端载荷相关的元件。假设承压能力由具有如下变量的函数组成 $C = f[Y_1(\lambda), Y_2(\lambda), \dots, Y_n(\lambda)]$, 其中 $Y_i(\lambda)$ 是承压能力变量(如: $Y_1 = t, Y_2 = SMYS$ 等), λ 是管道位置,则可使用式(A.22)方法组合的 Turkstra 法则类型估计总承压能力的最小值 C_{min} :

$$C_{min} = \min\{f[Y_1(\lambda), \dots, Y_1^*(\lambda), \dots, Y_n(\lambda)]\}_{i=1, \dots, n} \dots\dots\dots (A.22)$$

其中 $Y_i^*(\lambda)$ 表示引起最低承压能力的最大值或最小值。

如果承压能力变量 $Y_i(\lambda), i=1, \dots, n$, 是统计决定的,那么宜使用“非诱发的”变量 $Y_j(\lambda)$ 的条件分布或从总体分布中取 $Y_j(\lambda)$ 。

极值方法保证在可靠性分析中使用最小相似承压能力。如果 $Y_i(\lambda)$ 来源不同,宜评价以上最小值运算中的所有组合。以上方法被认为是与用于时间依赖性载荷函数组合的广义 Turkstra 法则等效的。如果假设不同元件的变量是独立的并且选择表征关键元件的随机变量是显著的,则其提供的估计可靠。当然,建议的方法仍然具有假设性,应在物理推理指导下建模。

“等相关系统方法”的缺点是在估计合适的相关系数时有困难,而对于极值方法,其弱点与载荷组合相关。对于大多数认知良好的问题,这两种方法都将给出等效的结果,可使用上述方法中的任一种来进行系统可靠性的评估。建议宜基于问题的物理本质选择方法并且用另一种方法验证所使用的方法。

A.9 结果的解释

概率分析的基本结果包括:

——失效概率;

——失效情况下给出基本变量的最可能值的设计点;

——重要性和灵敏度因子。

评价的主要目的是检查设计点是否是合理基于工程判断和来自类似问题的经验的,并且它不与明显的物理常识或限制条件相悖。首先,应该校核由可靠性分析得到的设计点对于所优化的问题是全局最小值的解决方案,而不是局部最小的。其次,还应该通过验证相应于随机变量可物理实现结果的设计点来评估由可靠性分析得来的结果。如果采用了响应面技术,有必要验证响应面的运用在设计点附近也是令人满意的。

可靠性计算的一个重要结果,是给出关于设计点灵敏度的信息并因此给出参数变化的可靠性或变量随机行为的变化规律。这种信息可以作为决策工具使用,提供在何处分配资源对增加管道的可靠性最有效的方法。

将参数的灵敏度因子定义为 $\partial\beta/\partial\theta$,其中 β 是可靠性指标, θ 可以是极限状态函数中的参数或基本变量分布中的参数。于是,由变化 $\Delta\theta$ 引起的更新的可靠性可近似用式(A.23)表示:

$$\beta(\theta + \Delta\theta) \approx \beta(\theta) + \frac{\partial\beta(\theta)}{\partial\theta} \Delta\theta \quad \dots\dots\dots (\text{A. 23})$$

令 α_i 表示设计点的失效平面内的归一化梯度向量的第 i 个元件。量 α_i^2 通常代表一(不确定性)重要性因子,可解释其为所考虑问题的一个基本变量(或一组变量)的不确定性的显著性的相对量度。因而可以使用重要性因子重点关注最重要的变量。

不敏感因子给出随机变量不确定性的可靠性的重要程度的相关信息。对于独立变量,通过式(A.24)给出:

$$\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha_i^2}} \quad \dots\dots\dots (\text{A. 24})$$

如果一独立变量的随机本质可以忽略,那么参数 γ_i 给出了可靠性指标相对误差的量度。其可以用于减少应该作为随机变量建模的量的数目,并因此降低可靠性分析的复杂性和计算时间。

A. 10 LRFD 格式中分项安全系数的校准

A. 10.1 简介

选择用于校准的设计格式的主要目的是取得参数变化范围内统一的安全水平,并且这种格式本身在设计上易于实现。选择的设计格式宜为所考虑的真实极限状态条件的简化表达方式,其代表进入设计问题的最显著的变量。关于校准方法的一般描述也可参见参考文献[26]。

在 LRFD 格式中的分项安全系数校准包括以下步骤(其对设计格式的初始校准或之后的重新校准或设计的再评定皆有效):

- 定义校准的范围,包括失效模式和安全等级的定义以及目标可靠性;
- 建立极限状态函数和相应的设计方程;
- 规定变量的特征值;
- 量化和确认变量的不确定性度量方法;
- 估计一组反映最重要不确定性来源的试算安全系数;
- 利用与所定义范围一致的带有特征值和分项安全系数的设计方程建立一组有代表性的设计实例;
- 对于设计实例估计失效概率并评价相对的目标值。

如果在跨度很大的设计实例范围内该组试算安全系数趋于提供不一致的安全系数,那么可以对式(A.25)求最小值得到最终的安全系数:

$$\sum_i \sum_j w_{ij} (P_{f,ij} - P_{f,target})^2 = \min \quad \dots\dots\dots (\text{A. 25})$$

式中:

$P_{i,j}$ ——与失效模式 i 有关的设计实例 j 点失效概率;

w_j ——设计相关频率的相应加权因子。

该组试算安全系数总体上会产生某些实例的目标水平以上的失效概率,因而有必要对其进行相应的调整。

如果仅有一个安全系数或安全系数的一个结果进入了极限状态,那么可在可靠性分析范围内将该安全系数作为参数来校准。当分项安全系数多于一个时,使用确定的目标可靠性选择引导设计的安全系数组时有一定的任意性。设计点提供了一个可用于选择分项安全系数的校核点,即:

$$\gamma_i = \frac{x_i^*}{x_i^c} \quad \dots\dots\dots (\text{A. 26})$$

式中:

x^* ——随机变量的结果值,“*”表示设计点的值;

c ——表示特征值;

i ——表示包含在公式中某个随机变量的下标。

该分项安全系数的定义保证了从设计方程再造设计点。

如果为多组不同设计确定的安全系数在给定的有效范围内显示了一致的行为,那么就可以假设建立一个具有普遍意义的安全系数。一般,宜限制安全系数的个数。而且,宜通过“设计点”的坐标和工程判断及经验指导单个安全系数的组合和取值。

强烈建议要把与所建立的工业实际相对的假设、限制和设计隐含条件连同最终校准的分项安全系数一起提供。

A. 10.2 设计方程导则

此目的是对于范围很宽和参数变化较大的设计情况建立一种简单和实用的、能提供统一可靠性水平的设计格式。所选择的设计方程宜最适宜近似极限状态方程中多数重要变量的影响。通用的设计方程可按以下给出:

$$g(S_d, R_d, a_d, \Theta_d, C, \delta) \leq 0 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 27})$$

式中:

S_d ——由 $S_{d,i} = S_{c,i} \gamma_{s,i}$ 确定的设计载荷值,下标 c 表示特征值,下标 d 表示设计值, $\gamma_{s,i}$ 是与载荷分量 i 相关的分项安全系数;

R_d ——由 $R_{d,i} = R_{c,i} / \gamma_{R,i}$ 确定的设计承压能力,其中 $\gamma_{R,i}$ 是与承压能力或强度分量 i 相关的分项安全系数;

a_d ——由 $a_{d,i} = a_{c,i} \pm \Delta a_i$ 确定的几何量的设计值,其中 Δa_i 是附加几何量;

Θ_d ——不包括在载荷和承压能力变量中的模型不确定性的设计值;

C ——可用的约束条件;

δ ——说明管道和管道元素重要性的系数,即说明要求的可靠性水平,如与给定安全区域相关的可靠性水平。

可用下列通用的形式表示不要超过的极限状态的条件:

$$g[(\gamma_i S_{i,c}), (\eta_j R_{j,c})] > 0 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 28})$$

非常通用的方法是引入至少一个与载荷或载荷效应相关的分项系数以及一个与抗力变量相关的分项系数。接下来要合理区分功能(主要是静态的)和环境(主要是动态的)载荷效应以得到合理和优化的设计格式。这是由环境载荷效应的不确定性导致的,其比功能载荷的不确定性更显突出。

通常使用 LRFD 格式的下列形式:

$$\gamma_E S_{C,E} + \gamma_F S_{C,F} \leq \frac{R_C}{\gamma_R} \quad \dots\dots\dots (\text{A. 29})$$

式中:

- S_C ——特征载荷效应(下标“E”和“F”分别指环境和功能载荷);
- R_C ——所考虑的失效模式的特征抗力或材料性能;
- γ_E, γ_F 和 γ_R ——经校准的安全系数。

在某些情况下,进一步区分由不同载荷现象引起的环境载荷或不同尺度和频率的载荷是有益的。

载荷效应和承压能力的设计值以特征值和分项系数或设计系数的结果形式给出。如果采用相互作用的公式建立管道承压能力的模型,可以采用多于一个的使用系数得到统一的安全水平。

所选择的设计格式宜为所考虑的真实极限状态条件的简洁表达方式,并宜代表进入设计的最显著的变量。

应按下式确定环境和功能载荷效应的设计值:

$S_{D,E} = \gamma_E S_{C,E}$ (A. 30)

$S_{D,F} = \gamma_F S_{C,F}$ (A. 31)

并按下式确定元件的承压能力或强度的设计值:

$R_D = \gamma_R R_C$ (A. 32)

或者,可以用设计值 f_D 表示材料的强度,通过下式确定:

$f_D = f_C / \gamma_m$ (A. 33)

其他相关性能可通过引入性能特征值分项系数的办法类似处理。

应使用下列方程定义的设计值, α_D 表示几何参数:

$\alpha_D = \alpha_C \pm \Delta\alpha$ (A. 34)

以下是使用过的符号:

- S_C ——特征载荷效应,其中 $S_{C,E}$ 和 $S_{C,F}$ 分别是环境和功能载荷效应;
- R_C ——基于材料性能特征值的元件抗力的特征值;
- f_C ——材料性能的特征值,如屈服强度;
- γ_i ——分项载荷效应系数,该值反映载荷效应的不确定性或随机性(通常大于 1.0);
- γ_R ——抗力或强度使用系数,该值反映包括材料性能和计算模型(如果没有包括在其他里面)在内的元件抗力的不确定性(通常小于 1.0);
- γ_m ——分项材料系数,该值反映材料性能的不确定性(材料的强度和其他特征性能)并会依赖于所考虑到实际的极限状态(通常包含在 γ_R 系数内);
- $\Delta\alpha$ ——附加的分项几何量,该值反映几何参数的不确定性。

A. 10. 3 特征值导则

A. 10. 3. 1 概述

失效概率依赖于各变量的设计值。特征值定义的变化(其由相关分项安全系数的相应变化作为补偿以使设计值保持不变)不会影响失效概率。不过,通过选择合适的特征值,可以降低失效概率对以下随机变量可变性变化的灵敏度以获得更强的一组 LRFD 准则。通常,这是通过将这些特征值定义为其概率分布的分位数而完成的。还可以通过可靠性分析中得到的设计点来指导这些选择。根据经验,已证明以下描述的选择特征值的方法是成功的。

A. 10. 3. 2 材料和承压能力变量

材料强度参数 R_C 的特征值一般宜为一个低的百分数。典型的,1%~5%的超出概率是合适的。

对于几何参数,特征值通常对应于设计中规定的公称值。然而,对于对整体抗力关键的参数,也宜相应于各概率分布的较低百分值来选择特征值,如:对于承压情况用最小钢管壁厚代替公称值。

A. 10.3.3 载荷效应变量

载荷效应及其他作用 $S_{i,c}$ 的特征值的取值不宜被超出。对于时间相关过程,特征值一般根据事件的重现值给出,如:在给定的参照期内发生一次。

A. 10.3.4 功能载荷

功能载荷的特征值一般取预计的年最大值。

A. 10.3.5 环境载荷

管道运行下环境载荷的特征值通常根据年超出概率为 10^{-2} 来定(对应于 100 年的重现期)。或者,如果关于气象和海洋条件联合发生的数据足够可用并相应选择了分项系数,那么可将环境载荷效应本身定义为具有 100 年的重现期。

对于暂时的设计条件(如施工期间),特征值一般宜与该条件下的时间长度相关,典型地选择为该条件持续时间的 3~5 倍。

A. 10.3.6 偶然载荷

偶然载荷特征值的选择要基于预先确定的超出概率。除非能证明存在其他一些超出概率,否则年超出概率一般取值小于 $10^{-4}/\text{km}$ 。

由于偶然载荷可有多种不同来源,因此即使精心选择载荷的特征值,要将所有可能的来源放在同一 LRFD 的设计格式中也是困难的。在这种情况下,更适合进行针对所考虑偶然载荷类型的结构可靠性分析,或者依靠使用传统安全系数的工程判断。

附录 B
(资料性附录)
统计数据库——不确定性取值

B.1 管线管基本性能

B.1.1 数据库

已经建立了管线管性能的统计数据库(不确定性度量),该数据库中的数据是来自大量的有代表性的制管厂家(参见参考文献[12]、[13])。数据库中包含的钢管直径从 40 mm 到 1 400 mm(1.6"到 56"),主要范围在 400 mm 到 1 000 mm(16"到 40")(对应的壁厚从 13 mm 到 37 mm)。管子材料包括碳钢和双相钢。母材金属的力学性能是在规定温度下在纵横两个方向测量的,焊缝金属是在交叉焊缝方向和热影响区(HAZ)(若相关)测量的。以下给出了通过数据库得到的主要结果,它对于海洋管道是有代表性的。

在参考文献[2]中给出了材料和几何参数的统计分布要求,它与设计要求和管线管性能的实际分布是一致的。

B.1.2 尺寸性质

所考虑到尺寸参数包括:

- 壁厚;
- 管径;
- 管子初始椭圆度。

考虑到统计性质,应区分无缝管线管和焊接管线管。焊接管线管是用极限公差更严的板材制造的,因而不确定性较小。不确定性值是依赖于质量和时间。

数据表明自 20 世纪 60 年代以来,由于技术的提高,管壁厚度的标准差已经减小。虽然目标标准差会因制造厂而异,但从不同厂家取样表明:实际的标准差在 0.15 mm 到 0.25 mm 的范围内变化。该标准差与实际的壁厚无关。

基于实际或公称壁厚的平均值彼此间存在差异。根据规格说明,实际壁厚有意与公称壁厚有所差别。它受几个因素的影响,如:壁厚上的公差与管线管每米质量长度上的公差不同。

对于焊接管,发现管径的标准差在壁厚偏差两倍的数量级,在直径的 1/1000 的数量级。这表明可考虑管径作为确定性的参数,即:变异系数(CoV)实际为零;参见表 B.1。相同的结论同样适用于无缝管,虽然标准差高一些。管径的标准差(一般)依赖于壁厚/直径比和管子等级。

管子椭圆度 f 与绕部分圆周的不同位置测量的最大和最小管径($D_{\max}$ 和 $D_{\min}$)有关,按下式计算:

$$f = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \dots\dots\dots (B.1)$$

初始椭圆度指制管阶段管子不受弯曲和压力载荷的情况。均值在 0.2%的数量级或更低,标准差在 0.1%的数量级或更低。

表 B.1 中给出了与焊缝管相关的典型不确定性取值。虽然管径可以因忽略不确定性而考虑为一确定性的量,但另外两个参数应该考虑为随机变量。一般宜将一组不确定性取值(即:固定的均值和 CoV)与管子制造过程(如:制造规格)说明联系起来,以下是典型的数字:

表 B.1 尺寸性质的典型不确定性取值——焊缝管

变量	分布	特征值 x_c	归一化的变量	$CoV=\sigma/\mu$ ‰ ^a	$(\mu-x_c)/\sigma$
壁厚, t	正态	t_{min}	$X_t=t/t_{min}$	0.5~2	2~7
		t_{nom}	$X_t=t/t_{nom}$		0~2
管径, D	正态	D_{nom}	$X_D=D/D_{nom}$	<0.1	0
初始椭圆度, f_0	对数正态	$f_{0,max}$	—	25~60	3~15
^a σ 是标准差; μ 是均值。					

对于管子壁厚, CoV 的下限可通过高质量的制管工厂得到, 高质量的工厂以设法使公称壁厚尽可能接近最小值为目标; 其他工厂为了降低管子被拒绝的风险不得不将目标定在使它们的公称壁厚恰当地高于最小值(标准差直到 7)。

因而, 当参考表 B.1 时, 除非提供进一步的文件, 一般选择保守的值。宜强调可以期望无缝管有较大的可变性。

公称设计壁厚应至少高于最小值 2 倍的标准差。与本要求一致, 归一化的变量 $X_t=t/t_{min}$ 可考虑作为 CoV 值为 2‰、均值等于 1.04 的正态变量。

由于焊接管的壁厚公差一般用毫米表示而不用百分比, 所以由于壁厚的均值的增加, 用正态化变量(百分数)表示的公差趋于减小。

B.1.3 力学性能

所考虑的力学性能包括:

- 屈服强度;
- 最终拉伸强度;
- 以硬度参数定义的应力—应变曲线形状;
- V 型缺口夏比冲击能;
- 临界裂纹尖端开口位移(CTOD)。

这些参数的不确定性值依赖于制管厂的质量和制造规格。对于不同的钢级, 环向屈服强度的 CoV 可以在代表性取样的基础上通过一个为 2 的因子来区分。要注意材料可显示出各向异性行为。对于通过周向展开制造的管子, 纵向的屈服和拉伸强度值可以低于横向值。各向异性的水平依赖于材料等级、化学组成、轧制条件和管子尺寸。焊缝的拉伸强度一般要求超过母材金属而且其数据一般是固定的。

母材的夏比断裂韧性性能与焊缝金属和热影响区金属不同(HAZ), 但(多少地)独立于钢级。

表 B.2 给出了典型的材料力学性能的不确定性值。对每个参数都给出了一个有代表性的变化范围。除非提供进一步的文件, 一般选择保守的值。对于表现为正态分布的设计参数, 使用至少高于最小值 2σ 的均值, 如: SMYS、SMTS 等。对于表现为非正态分布的参数, 如 V 型缺口夏比冲击能和 CTOD 等参数, 要求基于具体问题具体分析来决定。

表 B.2 力学性能的典型不确定性取值

变量	分布	特征值 x_c	归一化的变量	$CoV=\sigma/\mu$ ‰ ^a	$(\mu-x_c)/\sigma$
屈服强度 σ_y	正态	SMYS	$X_y=\sigma_y/\sigma_{SMYS}$	2~6	1~4
抗拉强度 σ_u	正态	SMTS	$X_u=\sigma_u/\sigma_{SMTS}$	1.5~6	2~10
夏比冲击功 C_v	对数正态	30J	—	10~50	2~20
临界 CTOD δ_{mat}	Beta	0.12mm	—	30~60	2~3
^a σ 是标准差; μ 是均值。					

通常,同一管子接头的力学性能间的相关性,或管子接头间同一力学性能的相关性是弱的或除下列情况外是可以忽略的:

- 同一板材制造的管接头间的屈服强度中度相关;
- 同一板材制造的管接头间的拉伸强度中度相关;
- 屈服和最终拉伸强度间中度相关。

B.1.4 材料疲劳性能

材料的疲劳性能包括:

- 裂纹扩展参数;
- S-N 参数。

疲劳裂纹扩展率, da/dN 按下式计算:

$$\frac{da}{dN}=C(\Delta K)^n$$

..... (B.2)

式中:

- C ——常数;
- ΔK ——应力强度因子范围。

如果缺乏指导文件,对于碳钢可应用表 B.3 给出的 C 和 n 值。常数 C 符合对数正态分布。

表 B.3 碳钢典型的裂纹扩展参数

焊接条件	N	C /N · mm	
	(固定的)	均值	CoV
空气中/阴极保护	3.1	1.1×10^{-13}	0.55
海水中	3.5	3.4×10^{-14}	0.91

根据 $\log(S)$ 和 $\log(N)$ 间的线性关系表示的 S-N 曲线为:

$$\log(N)=\log(K)-m\cdot\log(S)$$

对于 $S>S_0$ (B.3)

式中:

- N ——应力范围 S 下至疲劳的预计循环次数;
- S_0 ——应力范围阈值,其下不发生疲劳;
- K ——与平均 S-N 曲线有关的常数, m 是 S-N 曲线斜率的倒数。

对于海洋管道,三条 S-N 曲线是最相关的,即:母材的“B”曲线,焊缝的“C”曲线和环焊缝的“F2”曲

线,详细数据参见表 B.4。常数 K 服从对数正态分布

表 B.4 碳钢的 S-N 曲线

曲线	log10(K)			m	S_0 MPa
	均值	标准差	特征值	(固定的)	(固定的)
B	15.369 7	0.182 1	15.01	4.0	48
C	14.034 2	0.204 1	13.63	3.5	33
F2	12.090 0	0.227 9	11.63	3.0	13

B.2 最大内压——海洋管道(不包括陆上段)

管道设计中最大内压是最重要的功能载荷。可以根据压力设置和控制的实际运行情况来表征其概率分布函数。通常设置两个基本的压力等级来保证运行和安全控制:

- p_1 : 激活压力调节系统的压力等级,通常不超过 MAOP;
- p_2 : 激活压力安全系统的压力等级,不超过 MAIP。

偶然压力(水击)有效限制在 $p_1 \leq p \leq p_2$ 间,其中 $p_1 = \text{MAOP}$, $p_2 = \text{MAIP}$ 。

由于偶然事件一般发生次数不多,可通过泊松过程描述它们的发生概率。因此,随机压力变量 p 可通过以下移位的指数分布来描述:

$$F_p(p) = 1 - \exp\left(-\frac{p - p_1}{\lambda}\right) \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中: λ 是比例参数。

认为压力安全系统的失效概率每次水击时不大于 $P_{f,\text{PSS}}$, $P(p > p_2) = P_{f,\text{PSS}}$, 可用下式表示 λ :

$$\lambda = \frac{p_1 - p_2}{\ln P_{f,\text{PSS}}} \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

偶然事件一年可发生 n 次。下式给出了年最大偶然压力 p_{max} 的分布:

$$F_{p,\text{max}}(p_{\text{max}}) = [F_p(p_{\text{max}})]^n \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

上述分布渐进收敛到一型 Gumbel 分布。 p_{max} 的均值和标准差由下式给出:

$$\mu_{p,\text{max}} = p_1 + \lambda(\ln n + 0.577) \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

$$\sigma_{p,\text{max}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \lambda \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

在可靠性分析中,年最大内压的归一化不确定变量值由下式定义:

$$X_p = \frac{p_{\text{max}}}{p_d} \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

式中: p_d 是设计压力。

示例: $P_{f,\text{PSS}} = 10^{-4}$, $n = 12$, $p_2 = 1.1 p_1$ 并且 $p_1 = p_d X_p$ 时,可以认为服从均值为 1.03、CoV 值为 1.4% 的 Gumbel 分布。建议为下列值: $X_p = G(1.03 - 1.05; 1 - 2\%)$ 。

B.3 载荷效应不确定性——海洋管道

对于一些变量,足够的经验适用于作为推荐分布类型的基础,有时也可作为推荐分布参数的基础。表 B.5 中列出了环境载荷变量及其推荐的分布类型。

表 B.5 环境载荷变量和相应的分布类型

变量名称	载荷变量	分布类型
风	短期瞬时大风风速	正态
	长期 n 分钟的平均风速	Weibull
	年极端风速	Gumbel
波浪	短期瞬时海面升高	正态
	短期波浪高度	Rayleigh
	波浪周期	Longuet-Higgins
	长期显著浪高	Weibull
	长期名义上跨零点或高峰周期	对数正态
	显著浪高与名义上跨零点组合或高峰波浪期	3 参数 Weibull(高度)
	浪高以对数正态周期为条件的	
	年极端浪高	Gumbel
海流	长期速度	Weibull
	年极端速度	Gumbel
各种力	流体动力学系数	对数正态

除偶然载荷效应外,所有载荷效应同功能和环境载荷效应成比例。一般,特定载荷效应的不确定性量度可用下列归一化的形式表示:

$$X_E = \frac{S_E}{S_{F,c}}$$

..... (B.10)

或者

$$X_F = \frac{S_F}{S_{F,c}}$$

..... (B.11)

式中:

- S_E 和 S_F 是随机环境和功能载荷效应;
- $S_{E,c}$ 和 $S_{F,c}$ 是特征环境和功能载荷效应;
- X_E 和 X_F 是归一化的环境和功能载荷效应。

X_E 或 X_F 的均值通常称作偏差。

由于海洋环境的随机性本质,环境载荷效应中的可变性(CoV)一般比功能性载荷效应大很多。在管道经受弯曲作用的情况下,管道结构分为载荷控制的(LC)或位移控制的(DC)。在载荷控制的情况,弯曲效应用弯矩表示,而在位移控制情况下以弯曲应变表示。当力矩-应变关系呈非线性时,弯矩的可变性同弯曲应变不同。

偏差依赖于特征载荷效应的定义。可认为功能性载荷是无偏差的,相应的特征值定义为预期的最大值。在管道施工期间可假设环境载荷效应是无偏差的。如果考虑运行阶段,定义名义年最大值对100年重现期特征值的比值为环境载荷效应的偏差,其通常在0.6~0.8的量级。

表 B.6 提供了管道在不同条件和阶段的功能性和环境载荷效应的典型不确定性取值。除非有进一步的文件说明,一般取保守值。

表 B.6 归一化载荷效应的典型不确定性量度

管道阶段	X_F	X_E	条件
施工,卷筒	1.0	—	DC
施工,过度弯曲	$N(1.0;5\% \sim 10\%)$	$G(1.0;40\% \sim 60\%)$	DC
施工,铺管架倾斜	$N(1.0;5\% \sim 15\%)$	$N(1.0;40\% \sim 60\%)$	LC
施工,下垂弯曲	$N(1.0;5\% \sim 10\%)$	$N(1.0;20\% \sim 40\%)$	DC/LC
落底,临时的	$N(1.0;10\% \sim 20\%)$	$N(0.6-1.0;20\% \sim 40\%)$	DC/LC
落底,运行中	$N(1.0;10\% \sim 20\%)$	$N(0.6-0.8;20\% \sim 40\%)$	DC/LC
注: $G(1.0;40\% \sim 60\%)$ 指名义值等于1.0、CoV在40%~60%间的 Gumbel 分布。 $N(0.6 \sim 1.0;5\% \sim 10\%)$ 指均值在0.6~1.0之间、CoV在5%~10%间的正态分布。			

附录 C

(资料性附录)

目标安全水平——推荐方法

C.1 概述

计算目标安全或风险水平的方法有好几种,它们都可以使用。本附录描述如何对陆上和海洋管道选择目标安全水平。

确定合适的目标安全水平,对于通过应用可靠性分析和验证设计方程而得出基于可靠性的设计和运行指导方针是基础。但不同的应用间,所做的假设、计算方法和目标水平有必要保持一致。

虽然传统的设计方法为管道提供了足够的平均安全水平,但安全水平在不同的设计实例间却存在显著的差异。基于可靠性的设计目标是对于所有设计实例提供统一的安全水平。这可以通过满足预定的目标安全水平获得,如本附录所述。

对管道目标安全水平的评价宜主要基于传统管道设计中隐含的安全信息,使用来自设计标准制定时的适合的不确定性方法。并且,宜考虑根据潜在的人为伤害、环境损害和经济损失得到的实际后果。在本标准中这是通过基于失效后果和潜在危害对管道进行安全分级做到的。

所选择的目标水平可以同其他结构标准中定义的管道失效统计数据 and 目标安全量度相比较。当然,这主要是作为相对比较用,隐含在传统设计做法中的安全水平宜作为主要的选择依据。

对于海洋和陆上管道,和接下来给出的安全等级划分中建立的一样,控制失效概率作为后果的函数是恰当的。没有明确的风险和(或)安全水平可用时,对于海洋和陆上管道可以从 C.5 中得到相对安全等级的等效目标失效概率和极限状态分类。在没有针对具体情况进行深入的应用评价之前不宜使用这里给出的数值。

C.2 选择目标安全水平的原则

可按以下情况对管道失效和相关的不确定性进行分类:

- 与正态不确定性相关的计算出的风险;
- 人为误差;
- 未知现象。

载荷和抗力具有基本随机可变性和缺乏认知导致的正态不确定性。当随机载荷超过随机抗力时失效发生。在 SLS、ULS 和 FLS 设计中,失效概率通过使用分项安全系数得到控制。在结构失效计算中要说明这些正态的(基本的)不确定性。

人为误差与自然现象和正常不确定性不同,要使用不同的安全量度来控制误差导致的风险。首先,在制造和运行期间宜使用诸如检测和结构修理的质量保证和控制程序来控制认为误差。此外,可以通过运行管理系统对随时间发展的某些偶然工况进行探测。

如果在估计风险时所有的偶然动机都考虑到了,那么使用一确定的目标水平可以正确地得到想要的目标安全水平。但在结构可靠性分析中,只考虑了载荷和抗力性能的正态不确定性,失效概率的计算结果通常只表明是想象的或名义的,它们可能与观察到的失效率不相同。因而不考虑人为误差的效应。

在设计中不可能明确考虑载荷、抗力和失效模式上的未知现象,也不可能通过进一步的研究活动来了解。因而,安全目标不能解释未知现象。

C.3 管道失效数据

C.3.1 概述

在相对意义的基础上可以使用历史失效数据来设定管道的目标安全水平,其在这里作为指导方针来进行上述提到的最终选择。

在审查失效数据和以它们推断出目标安全水平前,首先有必要考查一下结构失效的原因以及如何通过风险和可靠性分析将这些原因同风险联系在一起。

通常,管道失效的主要原因可以概括为以下几点:

- 存在材料问题、施工或焊接缺陷、疲劳、腐蚀和其他材料性能降低机理导致的管线失效;
- 来自第三方活动,如针对海洋管道的抛锚和物体坠落,以及针对陆上管道的挖掘活动;
- 诸如阀和接头等辅助设备的机械失效。

失效概率依赖于参数的数目,包括管道位置、管道尺寸、输送流体的分类、管道服役年限和管道保护措施等。例如,大壁厚的大管径管道对外部伤害的抵抗力比小管径管道要强,气管道比油管道发生内腐蚀损害的可能性要小。因此,在评价管道的失效数据时,对这些方面的考虑是基本的。

C.3.2 海洋管道

一些组织已经对北海的数据进行了分析。英国健康和执行机构(HSE)已经建立了北海管道的事件数据库—PARLOC,参见参考文献[14]。该数据库提供了基于大约 160 000 km·a 管道和大约 10 000 个立管数据的最完整的信息。截至 1993 年底所报告的总事件数为 401 起,包括 292 起运行管道的和 109 起非运行管道的事件。292 起事件中包括的管道和管件事件分别为 174 起和 118 起。在 174 起管道运行事件中,大约 30% 涉及泄漏和流体损失。流体损失的主要原因是腐蚀(52%),另一个重要的原因是来自外部(抛锚、拖网和安装)的影响(28%)。发现流体损失的频率为以下量级:

- 所有钢管道,平均 $10^{-4}/(\text{km} \cdot \text{a})$;
- 非常短的管线和安全区域内, $10^{-3}/(\text{km} \cdot \text{a})$;
- 大管径和非常长的管道, $10^{-4}/(\text{km} \cdot \text{a}) \sim 10^{-5}/(\text{km} \cdot \text{a})$ 。

要注意到流体损失的频率表明对某些因素的敏感程度。例如,管道中段由抛锚(影响)导致的发生频率随管径和壁厚的增大而减小。对于挖沟/埋设管道,抛锚(影响)事件的频率要低于对于暴露管道的发生频率。

来自墨西哥湾失效统计数据的报道与在北海管道一致。

宜注意不能直接用结构可靠性分析计算得出的失效概率(其可能包含失效原因以外的不确定性)与经历过的失效(事件)率相比较。

偶然事件或情况可由制造质量差和操作误差引起。因此,ALS 目标水平的判定准则可与经历过的事件(失效)率相比较。即使经历过的风险水平是可接受的,ALS 的目标失效概率水平一般宜小于所经历的概率。这是因为除在数据库的案例中给出的代表性后果以外,ALS 判定准则还参考其他的后果。

近平台区域的已发生失效率要明显大于平台以外区域发生率的事实不宜必定反映在目标水平中。相反,由于会产生更严重的失效后果,近平台区域的目标概率宜小于平台以外区域的。该事实表明宜谨慎使用偶然统计概率,可从偶然事件中推断关于具体目标水平的有限信息。

因此,根据 $10^{-3}/(\text{km} \cdot \text{a}) \sim 10^{-4}/(\text{km} \cdot \text{a})$ 的实际流体损失频率,得到以下合理的目标水平:

- 对于 ALS 情况, $10^{-5}/(\text{km} \cdot \text{a}) \sim 10^{-6}/(\text{km} \cdot \text{a})$;
- 对于 ULS 情况,每条管道每年 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。

C.3.3 陆上管道

对于陆上管道,如果主要失效原因(腐蚀和外部损伤)考虑得足够细,那么认为从历史失效率可直接

与计算出的失效概率相比。

有两组历史失效率数据被认为可用作确认安全水平的目的：一组是美国运输部(DOT)关于输送和集输管道的数据(参见参考文献[27])；另一组是用于输气管道的欧洲管道事故数据组(EGIG)的数据(参见参考文献[28])。DOT的数据从1985年到1995年，总共6 000 000 km·a。EGIG数据从1970年~1998年，总共2 100 000 km·a。EGIG要求成员报告所有输气管道的事故，包括泄漏；DOT仅要求报告那些符合某些标准的事故(如：超过50 000美元的人身和(或)财产损失)。因为这种差异，一些研究者(参见参考文献[15])建议用DOT的失效率乘以4来说明未报道的事故。

表C.1和C.2汇总了陆上输气管道由DOT和EGIG确定的平均失效率(参见参考文献[16])。

表 C.1 陆上输气管道历史失效率

失效原因	DOT-可报道的×4		EGIG;2001	
	失效率/ (km·a) ⁻¹	总数的%	失效率/ (km·a) ⁻¹	总数的%
外部腐蚀	0.64×10 ⁻⁴	15	0.53×10 ⁻⁴	12
设备影响	2.10×10 ⁻⁴	50	2.20×10 ⁻⁴	50
所有其他的	1.45×10 ⁻⁴	35	1.67×10 ⁻⁴	38
总计	4.19×10 ⁻⁴	100	4.40×10 ⁻⁴	100

表 C.2 陆上输气管道仅大的泄漏和破裂的历史失效率
(忽略针孔泄漏)

失效原因	DOT-可报道的×4		EGIG;2001	
	失效率/ (km·a) ⁻¹	总数的 %	失效率/ (km·a) ⁻¹	总数的%
外部腐蚀	0.16×10 ⁻⁴	15	0.03×10 ⁻⁴	1
设备影响	0.51×10 ⁻⁴	49	1.61×10 ⁻⁴	75
所有其他的	0.37×10 ⁻⁴	36	0.52×10 ⁻⁴	24
总计	1.04×10 ⁻⁴	100	2.16×10 ⁻⁴	100

基于以上历史数据，有理由建议：对于所有失效，适用的总平均失效率目标(针对很宽的设计案例范围的)为3×10⁻⁴~4×10⁻⁴，对于大泄漏和破裂，为1×10⁻⁴~2×10⁻⁴。

C.4 结构设计标准中的安全水平

相关主管部门或研究机构已经很好地定义、规定和推荐了民用建筑和海洋平台的目标安全水平。

例如，北欧结构安全委员会发布的模板标准，基于失效机理和失效后果，规定了建筑结构的年目标失效概率在每年10⁻³~10⁻⁷的范围内。不清楚是否这些目标值考虑了系统组成元件或同时反映了系统的特性。在该标准的最新版本(1985)中，仅基于失效后果规定了10⁻⁴~10⁻⁶的范围。注意到非常严重的失效后果(其隐含考虑了人的死亡)要求非常高的目标安全水平。同时考虑经济因素以外的社会因素，即使对不严重的失效后果一般也采用高的目标安全水平。当将民用建筑同管道相比时，可能会争论在有人群地区的管道部分(即，海洋管道的近平台区域和陆上管道的2、3和4类地区)宜具有类似的目标失效概率，即：10⁻⁵~10⁻⁷的量级。其他直接的比较可能并不适合。

由于失效后果意味着严重的环境破坏,因此海洋平台相比于民用建筑更类似海洋管道。管道的目标安全水平因此宜与平台的目标水平更接近相关。

参考文献[18]是第一个海洋规范,其明确规定了平台的设计目标安全水平。根据失效后果给出了年目标失效概率,其范围从 10^{-5} (对人身安全的高风险或高的潜在环境污染或破坏)到 10^{-1} (功能受损或不适用性)。这些目标值用于验证 CSA 规范中的分项安全系数。

在海洋结构的设计中,广泛应用 API 和 NPD 标准。这些标准中未给出目标安全水平的技术说明。不过,通过研究估计了这些标准中隐含的目标安全水平,认为其满足以往的经验。对于海上承载结构, NPD 规范涉及到结构元件的每年 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 的目标安全水平,参见参考文献[19]。

比较广泛应用于海洋平台的设计规范中规定和隐含的安全水平,可以得出结论:虽然可能需要更精细的可应用于海洋管道的安全等级,但参考文献[18]的技术说明给出了一个合理的目标安全水平的范围,即 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ 的范围。

荷兰权威机构(参见参考文献[20])在考虑偶然载荷下管道失稳的情况下规定了一个每年 10^{-6} 的可接受的水平,对于其他载荷条件不要求该水平。丹麦权威机构规定了一个允许的每年 10^{-4} 的管子泄漏的水平。虽然没有发现其他量化的技术说明,考虑不同的极限状态和相应的失效后果,这两个水平连同为其他结构制定的安全水平一起提供了建立海洋管道目标安全水平的又一基础依据。

C.5 推荐的目标安全水平

C.5.1 概述

如果认为平均的隐含安全性是适合的,那么宜主要使用从目前设计实际中得到的隐含的安全水平。已通过各种技术研究估计了使用当前设计实际的各极限状态的隐含安全性,如:按 Scotberg(参见参考文献[21]和[22])给出的一般推荐意见选择海洋管道的目标安全水平,该意见特别关注更新的统计数据和技术模型的隐含内容;陆上管道的技术依据遵照参考文献[16]、[23]和[24]中给出的方法。

C.5.2 海洋管道

对于海洋管道,如果没有其他针对具体情况资料可用,那么宜采用表 C.3 中给出的可接受的失效概率。这些数字与当前设计实际中隐含的平均安全水平一致并调整为可说明失效后果。还要指出,推荐的目标安全水平与失效统计数据对比结果良好,而且在同其他结构标准的对比中是合理的。

表 C.3 相对安全等级的可接受失效概率,海洋管道

极限状态	概率基数	安全等级			
		低	正常	高	非常高
SLS ^a	年每千米	10 ⁰ 到 10 ⁻¹	10 ⁻¹ 到 10 ⁻²	10 ⁻² 到 10 ⁻³	NA
ULS	年每条管道	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	NA
FLS ^b					
ALS ^c					

^a 用于 SLS 的失效概率不是强制的。SLS 可能用于选择运行约束条件并可以通过运行者的偏好定义。超过 SLS 条件后要求进行 ALS 设计校核。

^b FLS 概率的基础是年失效率,即,通常是服役期的上一年或检测的上一年(如果没有进行检测,参照寿命期的失效率)

^c 指严重后果的总的可接受概率,包括事故概率,如: $P=P_{\phi|E}P(E)$

C.5.3 陆上管道

可以使用不同的方法选择陆上管道的安全或风险水平。在选择这些目标时应考虑的因素包括流体类型、人口密度(或地区等级)、压力和直径。

C.5.3 介绍了一种用于制定陆上天然气输送管道可靠性目标的方法。在制定这些目标时所做的关键假设描述为允许设计者在具体问题具体分析的基础上评价它们的可用性。

这种方法基于所有失效原因组合在一起时的最大可接受总失效率。每个安全等级的目标可靠性曲线目的是限制社会风险。它们是通过将历史失效频率(参见 C.3)和可能事件影响的有关考虑相结合得到的。

风险分析已用于确定此类可靠性水平,该水平确保实际风险水平能够被社会容忍。所选择的目标满足以下两个风险准则:

- 可接受的社会风险,以预计上报的每千米年的灾祸(由于事故)次数度量,假设管道附近的人口分布一致;
- 可接受的单一风险,定义为沿管道走向上的个体发生灾祸的风险。

在假设北美地区现有管道的总平均风险水平被认为可以接受的基础上,以下建立了可容忍的风险水平。基于此,选择可容忍的社会风险水平以符合所有管道的平均社会风险水平。通过计算广大范围内的管道设计实例的风险(不同的压力、管径、钢级和地区等级)估计了这些风险水平,这些设计实例是根据现有的 ASME 输气管道设计规范(参见参考文献[25])设计并按 ASME 的管道完整性管理标准维护的。基于对已出版指南的整理,单一可容忍风险水平选择为:一级为 10^{-4} ,二级为 10^{-5} ,三和四级为 10^{-6} 。

对于所有设计条件,选择目标可靠性水平以提供一个固定水平的社会风险,其等于计算出的容忍值。于是产生了一组固定风险的、目标可靠性曲线,每一条对应一个地区等级,其作为管子尺寸和设计压力的函数改变要求的可靠性水平,即:要求的可靠性随由受影响的人数度量的失效后果而变化。可靠性曲线的下限同样提取用来限制位于管道走向上单个人所经受的单一风险水平。

该方法中用于设定目标可靠性的主要准则是在维持一个近似不变的风险水平的同时,获得 $2 \times 10^{-5}/(\text{km} \cdot \text{a})$ 的平均社会风险水平。

由于给定级别的失效后果作为预期受影响人数的线性函数随 a) 受影响地区的面积大小(与 $P \cdot D^2$ 成正比)而增长,b) 所引发的概率(其假设为大约与 D 成正比)而增长。因此,假设可能的后果随函数 $P \cdot D^3$ 而减小。

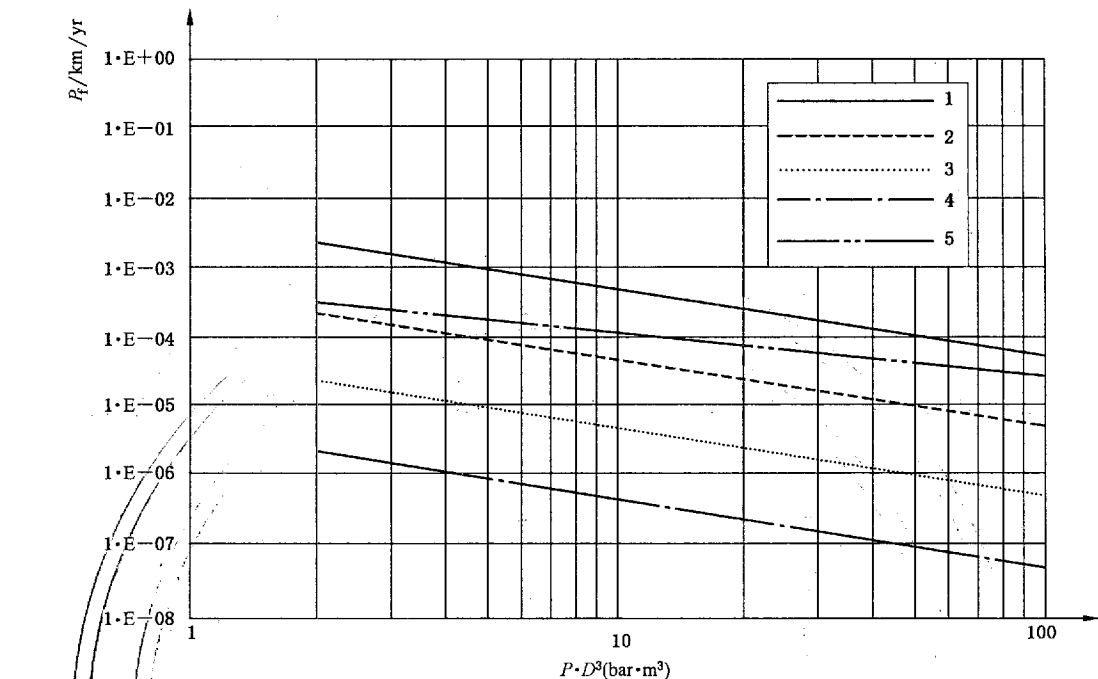
以下为关联失效率和地区等级分类的方程:

安全等级 1(低)	$P_{f, \text{target}} = \frac{5 \times 10^{-3}}{P \cdot D^3}$	 (C.1)
安全等级 2(中)	$P_{f, \text{target}} = \frac{5 \times 10^{-4}}{P \cdot D^3}$	 (C.2)
安全等级 3(高)	$P_{f, \text{target}} = \frac{5 \times 10^{-5}}{P \cdot D^3}$	 (C.3)
安全等级 4(非常高)	$P_{f, \text{target}} = \frac{5 \times 10^{-6}}{P \cdot D^3}$	 (C.4)
单一风险	$P_{f, \text{target}} = \frac{5.2 \times 10^{-4}}{(P \cdot D^3)^{0.66}}$	 (C.5)

式中:

- $P_{f, \text{target}}$ ——失效中最大可接受失效概率(除小量泄漏外),单位为每千米年;
- P ——内压,单位为巴(巴为非法定计量单位,1 巴=0.1 兆帕);
- D ——管子外径,单位为米(m)。

图 C.1 给出了所推荐的目标可靠性曲线的一组结果(假设 ASME 的地区等级和本标准中使用的安全等级是直接对应的),其可以用于 ULS、FLS 和 ALS。对于 SLS,可以使用表 C.3 中给出的失效概率。概率基数是每千米年的失效率。对于暂时条件,如果小于 1 年,可应用实际的周期。



图例：
1——表 C.3 中的安全等级 1(低)；
2——表 C.3 中的安全等级 2(中)；
3——表 C.3 中的安全等级 3(高)；
4——表 C.3 中的安全等级 4(非常高)；
5——方程 C.5 中的单一风险。

图 C.1 陆上管道,ULS,FLS,ALS,可接受失效概率

使用了最新水平和保守的简化假设方法制定了上述的目标可靠性水平。目标总体看来是保守的,保守程度依具体情况而不同。有可能被进一步检查的保守性来源包括:

- 在管道的设计寿命内的任何时间目标都满足。由于可靠性因退化机制而随时间降低,在修复后(如内检测和修复)又立即增加,因此时间上满足目标的临界点仅仅是修复事件发生前的。由于在最小可靠性点上失效率保持在目标以下,因此整个设计寿命期内的平均失效率低于目标;
- 目标是为满足与新管道相关的安全性而设计的,而新管道是按最好的实际水平来维护的。因此,导致了比观察现有管道得来的历史失效率更低的失效概率。

基于此,建议可以在一些实例中使用细致的分析以产生不太保守的目标水平。

参 考 文 献

- [1] EFRON B and TIBSHIRANI R. , *Bootstrap Method for Standard Error Confidence Intervals and Other Measures of Statistic Accuracy*, Statistical Science, 1. pp. 54-72. (1986)
- [2] DNV OS-F101, *Submarine pipeline systems*, Det Norske Veritas
- [3] DEMOFONTI ET AL. : *Proceedings of the international Pipeline Conference 1998*, Vol. II, pp. 699-704, 1998
- [4] PISTONE ET AL. , *Transition Temperature Determination for Thick Wall Line Pipes*, 3R international, pp. 199-204, 3/2000
- [5] KNAUF, HOPKINS. *The EPRG guideline on the assessment of defects in transmission pipeline girth welds*, 3R International, 10-11/96, pp. 620-624
- [6] DITLEVSEN, O. (1981), *Uncertainty Modelling with Application to Multidimensional Civil Engineering Systems*, McGraw-Hill Inc, New York
- [7] THOFT-CHRISTENSEN, P. and BAKER, M. J. (1982), *Structural Reliability Theory and its Applications*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [8] ANG, H. S. AND TANG, W. H. (1984), *Probabilistic Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. II, John Wiley and Sons, New York
- [9] AUGUSTI, G. , BARATTA, A. and CASCIATI, F. (1984). *Probabilistic Methods in Structural Engineering*, Chapman and Hall, London, 1984
- [10] MADSEN, H. O. , KRENK, S. & LIND, N. *Methods of Structural Safety*, Prentice Hall Inc. , Englewood Cliffs, N. J. , 1986
- [11] MELCHERS, R. E. (1987), *Structural Reliability Analysis and Prediction*, Ellis Horwood Series in Civil Engineering, Halsted Press, England
- [12] JIAO G. , SOTBERG T. , BRUSCHI, R. and IGLAND, R. , *The SUPERB Project : Linepipe Statistical Properties and Implications in Design of Offshore Pipelines*, 16th Int. Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Yokohama, 1997
- [13] JIAO, G. , MØRK, K. J. , BRUSCHI, R. and SOTBERG, T. : *The SUPERB Project : Reliability Based Design Procedures and Limit State Design Criteria for Offshore Pipelines*, 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Yokohama, April 13-18, 1997
- [14] ROBERTSON, J. , SMART, D. and AL-HASSAN, T. (1995). *PARLOC, Offshore North Sea Pipeline and Riser Loss of Containment Study*, Offshore Mechanics Arctic Engineering Conference
- [15] HOPKINS P. , 1995, *Pipeline Maintenance, Inspection and Revalidation*, EPRG/PRC 10th biennial joint technical meeting on line pipe research, Paper Number 22
- [16] ZIMMERMAN, T. J. , NESSIM, M. A. , MCLAMB, M. , GLOVER, A. , ROTHWELL, B. and ZHOU, J. 2002. *Target Reliability Levels for Onshore Gas Pipelines*, 4th International Pipeline Conference, IPC02-27213, September.
- [17] NKB (1978), *Guidelines for Load and Safety Regulations for Load-carrying Structures*, Report No. 55, Nordic Committee for Building Regulations
- [18] CSA (1987), *General Requirements, Design Criteria, Environment and Loads*, S471, Canadian Standards Association
- [19] MOAN, T. (1988), *The Inherent Safety of Structures Designed according to the NPD*

Regulations, SINTEF Report STF71 F88043, Trondheim

[20] Dutch Regulations (1987), *Government Policy Regarding Laying of Offshore Pipelines*, Letter of the Dutch Authority to NOGEPa

[21] SOTBERG, T., MOAN, T., BRUSCHI, R., JIAO, G. and MØRK, K. J.: *The SUPERB Project: Recommended Target Safety Levels for Limit State Based Design of Offshore Pipelines*, 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Yokohama, April 13-18, 1997

[22] SOTBERG, T. and BRUSCHI, R. (1992), *Future Pipeline Design Philosophy—Framework*, Offshore Mech and Arctic Engrn Conf, June 9-11, Calgary

[23] NESSIM, M. A., ZIMMERMAN, T. J., MCLAMB, M., GLOVER, A., ROTHWELL, B. and ZHOU, J. 2002, *Reliabilitybased Limit States Design for Onshore Pipelines*, 4th International Pipeline Conference, IPC02-27213, September

[24] NESSIM, M. A., ZHOU, W. ZHOU, J., ROTHWELL, B., and MCLAMB, M. 2004, *Target Reliability Levels for the Design and Assessment of Onshore Natural Gas Pipelines*, Proceedings, International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, October, 2004, Paper No. IPC04-0321.

[25] ASME B31.8S-2004, *Managing System Integrity of Gas Pipelines*

[26] ENV 1991-1 Eurocode 1, *Basis of Design and Actions on Structures, Part 1, Basis of design*

[27] EGIG 2001, *Gas Pipeline Incidents—5th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group—1970-2001*, EGIG Doc. No. 02. R. 0058

[28] VIETH, P. H., MORRIS, W. G., ROSENFELD, M. J., and KIEFNER, J. F. 1997, *DOT Reportable Incident Data Review—Natural Gas Transmission Systems—1985 Through 1995*. Final Report Contract No. PR-218-9603 Prepared for the Line Pipe Research Supervisory Committee, Pipeline Research Committee of PRC International

[29] ISO 17776, *Petroleum and natural gas industries—Offshore production installations—Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment*

[30] ISO 3183-2:1996, *Petroleum and natural gas industries—Steel pipe for pipelines—Technical delivery conditions—Part 2: Pipes of requirements class B*

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
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
GB/T 29167—2012/ISO 16708:2006

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

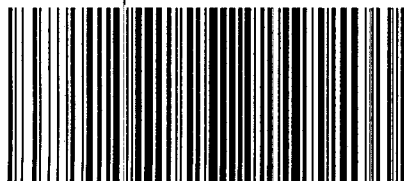
*

开本 880×1230 1/16 印张 3.5 字数 98 千字
2013年6月第一版 2013年6月第一次印刷

*

书号: 155066·1-47235 定价 48.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 29167-2012