

# 化工设备失效概率 JC 修正模型研究

石超<sup>1</sup>, 罗艾民<sup>2</sup>, 陈文涛<sup>1</sup>, 多英全<sup>2</sup>, 吴宗之<sup>2</sup>

1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029

**摘要** 由数据库统计所得的设备通用失效概率,是在设备各失效模式下的参数变量均达到各自均值时所对应的失效概率。本文针对基于风险的检测技术(RBI)设备修正因子的应用缺陷,结合结构可靠度理论,分析均值一次二阶矩法在实际应用过程中的局限性,建立了基于当量正态化(JC)法的通用失效概率修正模型。实例分析表明,JC法考虑了随机变量的实际分布类型,能较准确地预测设备的失效情况。

**关键词** 当量正态化;失效概率;风险

中图分类号 X937

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.08.004

## Chemical Equipment Failure Probability Model Based on JC Method

SHI Chao<sup>1</sup>, LUO Aimin<sup>2</sup>, CHEN Wentao<sup>1</sup>, DUO Yingquan<sup>2</sup>, WU Zongzhi<sup>2</sup>

1. School of Civil & Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100029, China

**Abstract** The chemical equipment general failure probability based on database statistics is the probability when the parameters of all failure modes take their respective mean. Risk Based Inspection (RBI) technology includes qualitative RBI judgment and quantitative RBI calculation. Through qualitative judgments, the relative level of risks can be obtained. The devices with relatively low risks do not need a quantitative RBI, and further quantitative RBI will be focused on those with relatively high risks. It is found that there are two important aspects in the use of pressure equipments in China, that is, severe defects and over-use, and it is proposed to control the risks. The shortcomings of the current API 581 method regarding to the severe defects and over-use are analyzed in this paper. With the reliability theory, the limitations of the mean first order second moment method are shown in practical applications as well as the shortcomings of RBI. In addition, the general failure probability of equipment based on JC model is calculated. This method can be used for any probability distribution and is not limited to the normal distribution. With the actual distribution of random variables being taken into consideration, this method can be used equally well for logarithm normal distribution, Weibull distribution or extreme value type I distribution. Besides, by means of equivalent normal deviation, the non-normal variable is transformed into a normal variable. The linearization point is not located at the mean value but the failure boundary, and is called the design check point, corresponding to the structural maximal failure probability, which can be used to estimate the failure consequence of equipment accurately.

**Keywords** equivalent normalization; failure probability; risk

## 0 引言

在人类生产和社会实践中,安全是永恒的主题之一。进入机器生产和工业化社会后,随着生产规模的扩大,灾难性事故频繁发生,生产活动中的人身安全及其潜在风险越来越突出,已成为当今普遍关注的社会问题<sup>[1]</sup>。

定量风险评价(Quantitative Risk Assessment, QRA)也称

概率风险评价,通过对系统或设备失效概率和失效后果的严重程度进行量化分析,进而精确地描述系统风险<sup>[2-3]</sup>。QRA方法的核心是对事故发生概率和事故后果拟合,因此设备失效概率的计算至关重要。化工企业主要的设备和关键机组多系大型、高速、结构复杂的设备和机器,大多伴随高温、高压和易腐蚀物质,设备的失效机制复杂,确定设备的失效概率难

收稿日期:2010-02-01;修回日期:2011-02-15

作者简介:石超,博士研究生,研究方向为企业安全管理、危险化学品定量风险计算方法研究,电子信箱:shi\_da\_chao@126.com

度大。目前,失效概率分析方法主要有定性、半定量和定量3种方法。失效概率的定量计算方法主要包括统计法和解析法。对于统计方法,现在通用的失效数据库多引自国外,国内相关数据库很少。但引用国外数据资源未结合中国设备设计和使用具体情况,并且统计出的失效概率存在统计数字平均化等缺陷,无法区分诸多因素对失效概率的影响。根据失效机制,计算失效概率的解析方法很多,大多计算过程极为复杂,计算时间较长,需要借助于计算机辅助技术。

基于风险的检测技术(RBI)针对每一种失效机制,都提供了相应的计算方法,包括减薄、应力腐蚀开裂、氢腐蚀、疲劳、脆化等计算模型<sup>[4-5]</sup>。根据每一种失效模型并结合设备的操作情况、日常维护情况进行设备的失效概率评估。作者在文献[6]中针对严重超标缺陷与长期超期服役问题,分析了现行RBI方法的不足。本文在RBI技术的基础上,结合结构可靠度原理,分析了改进的一次二阶矩法在实际应用中的不足,引入当量正态化法,提出一种基于JC法的RBI失效概率修正计算模型,可在RBI失效概率计算模型的基础上完成对设备通用失效概率的修正。

### 1 基础泄漏概率的 RBI 计算模型

RBI技术以风险分析为基础。风险具有二维性:失效可能性和失效后果。RBI技术采用系统论的原理和方法<sup>[4]</sup>,对选定装置中的各生产过程设备进行风险评估,包括失效可能性和失效后果评估,按照风险的级别,找出薄弱的环节,优化检验的效率,降低检维修的费用,提出安全技术建议和对策。RBI失效可能性分析主要在于研究设备的失效机制<sup>[4]</sup>,包括定性分析和定量分析两种类型。无论使用哪一种分析类型,失效可能性均必须考虑运行环境所引起的设备材料结构的失效机制和速率,确定失效模式,识别和监控运行失效机制的有效性,通过将预期的失效机制、失效速率或敏感性、检测数据和检测有效性结合,明确每种失效类型和失效模式的失效可能性。

RBI作为设备管理的新技术,其关键是在企业建立以风险为导向的设备管理体系。RBI技术是一个动态的、持续改进的过程。在RBI失效概率的计算中,根据设备的特定运行环境,为每个设备制定了一个设备修正系数 $P_q$ ,设备修正系数由4个部分组成<sup>[4-5]</sup>,如图1所示。

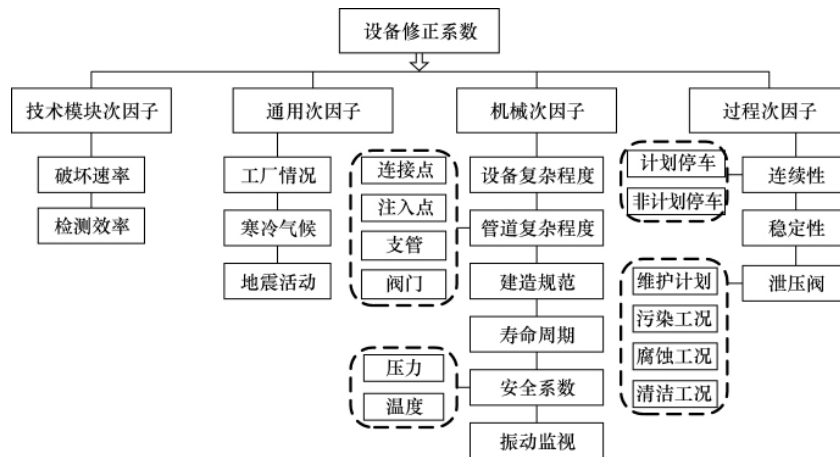


图1 设备修正系数

Fig. 1 Equipment correction coefficient

作者曾对中国设备严重超标缺陷与长期超期服役等问题,分析了现行RBI标准在中国应用的局限,其设备修正系数中机械次因子的计算需要进行修正<sup>[6]</sup>。本文在RBI技术的基础上,结合结构可靠度原理,提出一种新的基于当量正态化法的失效概率修正因子模型。

### 2 结构可靠度原理

根据可靠度定义和概率论基本原理,度量结构的可靠度用结构的可靠概率 $P_s$ ,即结构能完成预定功能的概率表达:

$$P_s = P\{z \geq 0\} \quad (1)$$

相反,如果结构不能完成预定的功能,相应的概率为结构失效概率。根据结构可靠度的定义和概率论基本原理,若已知极限状态方程的基本变量 $x_i(i=1,2,\dots,n)$ 的联合分布密度函

数为 $f_{x_i(1,2,\dots,n)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,结构的失效概率 $P_f$ 为<sup>[7-9]</sup>

$$P_f = P\{z < 0\} = \int_{z < 0} \dots \int f_{x_i(1,2,\dots,n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

计算失效概率最理想的方法是由上式精确求解,但在实际的结构可靠度分析中,随机变量的数目通常很大,功能函数多为非线性,如果直接利用式(2)求解,多维积分的数学处理十分复杂,计算工作量也很庞大,有些问题甚至不存在解析解。因此实际工作中常采用近似的数值方法计算 $P_f$ 。

假设结构的功能函数 $z=g(R,S)=R-S$ ,极限状态方程为 $z=R-S=0$ ,其中 $R$ 为结构的综合抗力随机变量, $S$ 为综合作用效应随机变量,且 $R,S$ 相互独立,均为正态分布,其相应的均值和方差分别为 $\mu_R, \sigma_R^2, \mu_S, \sigma_S^2$ ,则功能函数 $z=R-S$ 也服从正态分布,其均值 $\mu_z = \mu_R - \mu_S$ ,方差 $\sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$ 。概率密度函数 $f_z(z)$ 为

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

引入标准化随机变量  $t=(z-\mu_z)/\sigma_z$ , 可靠度指标  $\beta=\mu_z/\sigma_z$ , 则结构的失效概率  $P_f$  为

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (3)$$

### 3 基于 JC 法的修正因子建立

设备的可靠性模型计算可以看出,任何统计性质的数据都被假定为正态分布,一般情况下不服从正态分布时,将功能函数在均值点采用 Taylor 级数展开,故称均值一次二阶矩法。但是,均值一次二阶矩法不能考虑随机变量的实际分布,只取用随机变量的一阶矩(均值)和二阶矩(方差)。当  $P_f < 10^{-5}$  时,使用中心点法必须正确估计基本变量的概率分布和联合分布类型。 $\beta$  较大时计算结果比较粗糙;对有相同力学含义但不同表达方式的极限状态方程,由中心点法计算的可靠指标可能不同。对于非线性结构的功能函数,由于随机变量的均值不在极限状态曲面上,均值一次二阶矩法进行线性化处理展开后的线性极限状态平面,可能会较大程度地偏离原来的可靠指标曲面,误差较大。

为此,国际结构安全度联合委员会(JCSS)推荐使用当量正态化法<sup>[9]</sup>。当量正态化法能考虑随机变量的实际分布类型,并通过“当量正态化”途径,把非正态变量当量化为正态变量;线性化点不是选在平均值处,而是选在失效边界上,并且该线性化点(设计验算点)是与结构最大可能失效概率相对应的。

将功能函数的线性化 Taylor 展开点选在失效面上,同时考虑基本随机变量的实际分布。设结构的极限状态方程为<sup>[9]</sup>

$$z = g_x(x) = 0 \quad (4)$$

再设  $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$  为极限状态面上的一点,可靠度指标为

$$\beta = \frac{\mu_{z_i}}{\sigma_{z_i}} = \frac{g_x(x^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g_x(x^*)}{\partial x_i} (\mu_{x_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g_x(x^*)}{\partial x_i}\right]^2 \sigma_{x_i}^2}} \quad (5)$$

定义变量  $x_i$  的灵敏度系数为

$$\alpha_{x_i} = \cos\theta_{x_i} = \cos\theta_{y_i} = -\frac{\frac{\partial g_x(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g_x(x^*)}{\partial x_i}\right]^2 \sigma_{x_i}^2}} \quad (6)$$

极限状态面上的点  $p^*$  (在  $x$  空间中的坐标为  $x^*$ ) 到标准化空间中原点  $O$  的连线,其方向余弦为  $\cos\theta_{y_i}$ , 长度为  $\beta$ ,  $p^*$  称为设计验算点。设计验算点  $p^*$  在原始  $x$  空间中的坐标为

$$x_i^* = \mu_{x_i} + \beta \sigma_{x_i} \cos\theta_{x_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

再设  $x$  中的  $x_i$  为非正态分布变量,其均值为  $\mu_{x_i}$ , 标准差为  $\sigma_{x_i}$ , 概率密度函数为  $f_{x_i}(x_i)$ , 累积分布函数为  $F_{x_i}(x_i)$ ; 与  $X_i$  相对应的当量正态化变量为  $x'_i$ , 其均值为  $\mu_{x'_i}$ , 标准差为  $\sigma_{x'_i}$ , 概

率密度函数为  $f_{x'_i}(x'_i)$ , 累积分布函数为  $F_{x'_i}(x'_i)$ 。JC 法的当量正态化条件要求在验算  $x'_i$  处  $x'_i$  和  $x_i$  的累积分布函数和概率密度函数分别对应相等。

根据当量正态化条件,可得到当量正态化变量的均值和标准差<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \mu_{x'_i} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)] \sigma_{x_i} \\ \sigma_{x'_i} = \frac{\varphi[\Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)]]}{f_{x_i}(x_i^*)} \end{cases} \quad (8)$$

对于对数正态分布、Weibull 分布、极值 I 型分布等常用分布类型,均可由式(8)得到所需当量正态变量均值和标准差。但在数值计算中,有时并不需要对具体分布推导出均值和标准差的显示表达式<sup>[8,10]</sup>。JC 法迭代计算步骤见图 2。

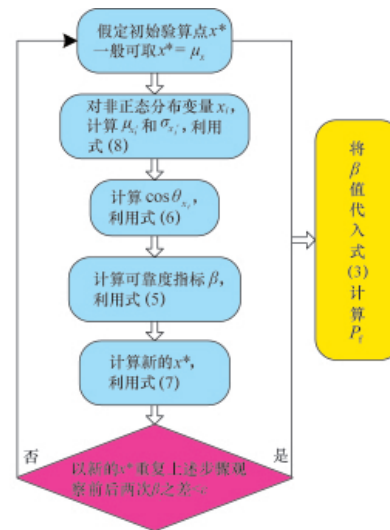


图 2 JC 法迭代计算步骤

Fig. 2 Iterative calculation steps for JC method

### 4 通用失效概率的 JC 修正模型

假设设备有  $n$  个潜在的失效机制,各失效机制对应的失效概率为  $P_{f1}, P_{f2}, \dots, P_{fn} (1, 2, \dots, n)$ 。根据串联模型,一般情况下,  $P_{fn}$  值较小,忽略其乘积,设备的总失效概率为

$$P_{total} \approx P_{f1}(X_1) + P_{f2}(X_2) + \dots + P_{fn}(X_n) \quad (9)$$

式中  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为各失效模式的参数变量,由数据库统计得出的通用失效概率是在  $X_1, X_2, \dots, X_n$  等失效模式的参数变量达到各自均值时所对应的失效概率,即

$$P_{gen} = P(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \quad (10)$$

设备的实际失效概率可表示为

$$P_{real} = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = P_{gen} \cdot \left( \frac{P_{f1}(X_1)}{P_{gen}} + \frac{P_{f2}(X_2)}{P_{gen}} + \dots + \frac{P_{fn}(X_n)}{P_{gen}} \right) \quad (11)$$

式中,无量纲  $P_{fn}(X_n)/P_{gen}$  为实际潜在失效机制对设备失效概率的偏离程度。基于 RBI 与 JC 法结合的基础概率修正因子表示在严重腐蚀、疲劳、高温等环境下使用的设备存在着明显与时间相关的退化机制时,设备失效概率的 JC 偏离为

$$n_{R-RBI} = \frac{P_i}{P_{gen}} \quad (12)$$

化工设备失效概率的修正模型为

$$P_{loss} = P_{gen} \cdot P_q \cdot n_{R-RBI} \cdot P_m \quad (13)$$

化工设备失效概率的 JC 修正模型如图 3 所示。

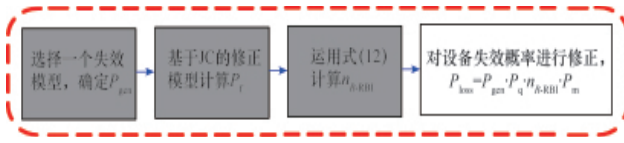


图 3 化工设备失效概率 JC 修正模型

Fig. 3 JC correction model for chemical equipment failure probability

### 5 计算实例

某 LPG 储罐设计考虑初始结构承受永久应力  $E$  和可变应力  $C$  作用,储罐内部结构的腐蚀是造成结构失效和泄漏的主要原因。该 LPG 储罐结构强度  $S$  服从对数正态分布,均值为 18.5kN,标准差为 2.1kN;永久应力  $E$  服从正态分布,均值为 11kN,标准差为 1.3kN;可变应力  $C$  服从极值 I 型分布,均值为 1.9kN,标准差为 0.9kN。计算该 LPG 储罐的初始失效泄漏概率(不考虑检验和维护状态)。

储罐的功能函数  $z=S-E-C$ ,其梯度为  $\nabla g(S,E,C)=(1,-1,-1)^T$ 。根据基于当量正态化法的失效概率迭代计算程序,应用 Matlab 编程计算,部分语言如下(有省略)。

```
miuX=[18.5;11;1.9];sigmaX=[2.1;1.3;0.9];% miuX:X 的平均值向量,sigmaX:X 的标准差向量
sLn=sqrt(log(1+(sigmaX(1)/miuX(1))^2));mLn=log(miuX(1))-sLn^2/2;% sLn:对数正态分布的参数 sigma_ln, mLn:对数正态分布的参数 mu_ln
aEv=sqrt(6)*sigmaX(3)/pi;uEv=-psi(1)*aEv-miuX(3);
% aEv:极值 I 型分布的参数 alpha 的倒数,uEv:极值 I 型分布的参数 u 的负值
cdfX=[logncdf(x(1),mLn,sLn);1-evcdf(-x(3),uEv,aEv)];%
cdfX:X 的累积分布函数
pdfX=[lognpdf(x(1),mLn,sLn);evpdf(-x(3),uEv,aEv)];%
pdfX:X 的概率密度函数
nc=norminv(cdfX);sigmaX1(1:2:3)=normpdf(nc)./pdfX;
miuX1(1:2:3)=[x(1:2:3)-nc.*sigmaX1(1:2:3)];
gs=gX.*sigmaX1;alphaX=-gs/norm(gs);% alphaX:X 的单位灵敏度向量
bbeta=(g+gX*(miuX1-x))/norm(gs);
x=miuX1+bbeta.*sigmaX1.*alphaX;
```

经过 9 次迭代计算,得到可靠度指标  $\beta=bbeta=2.2550$ 。将  $\beta$  值代入式(3),

```
syms x
```

$$f=0.3989*\exp(-0.5*x^2);$$

$$\text{int}(f,x,-\text{inf},-2.2018)$$

得到  $P_i=1.21 \times 10^{-2}$ 。

### 6 结论

RBI 失效概率的分析以设备的设计寿命和设备当前已经运行的年数为基础,设备的设计寿命是其服务于工艺过程的一个函数。通过结构可靠度理论,在腐蚀、疲劳、高温等环境下存在着明显与时间相关的退化机制的设备,可以计算设备的安全系数和可靠指标,使用基于 JC 法的化工设备失效概率修正模型,可以考虑设备失效参数的实际分布,避免了正态分布一刀切的传统求解方法。

### 参考文献 (References)

- [1] 吴宗之. 促进安全发展的若干认识与对策探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2008(增): 1-3.  
Wu Zongzhi. *Journal of Safety Science and Technology*, 2008(S): 1-3.
- [2] 吴宗之. 城市土地使用安全规划的方法与内容探讨[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 86-90.  
Wu Zongzhi. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(6): 86-90.
- [3] 吴宗之, 多英全. 区域定量风险评价方法及其在城市重大危险源安全规划中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(4): 46-49.  
Wu Zongzhi, Duo Yingquan. *Engineering Sciences*, 2006, 8(4): 46-49.
- [4] American Petroleum Institute. API STD581 Risk-based inspection base resource document [S]. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2000.
- [5] American Petroleum Institute. API STD580 Risk-based inspection[S]. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2002.
- [6] 石超, 张圣柱, 罗艾民, 等. 基于可靠度理论的 RBI 修正模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5): 77-81.  
Shi Chao, Zhang Shenzhu, Luo Aimin, et al. *Journal of Safety Science and Technology*, 2010, 6(5): 77-81.
- [7] 合肥通用机械研究所压力容器检验站. 大连 WEPEC 重油加氢、常减压、催化裂化、制氢装置风险评估报告[R]. 合肥: 合肥通用机械研究所, 2004.  
Pressure Vessels Inspection Station, Hefei General Machinery Research Institute. Risk evaluation report of Dalian WEPEC VRDS, CVD, FCC, HP units[R]. Hefei: Hefei General Machinery Research Institute, 2004.
- [8] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.  
He Shuiqing, Wang Shan. *Structural reliability analysis and design*[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1993.
- [9] 张明. 结构可靠度分析——方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
Zhang Ming. *Structural reliability analysis—Methods and procedures*[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [10] Ang A H-S, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design. Volume II: Decision, risk and reliability [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.

(责任编辑 朱宇)