在役钢结构概率安全评定方法

骆红云 钟群鹏 张 峥

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对大型在役钢结构的安全评定问题,综合利用第二水平法和Monte Carlo 法,提出了静载和疲劳条件下概率安全评定的方法;并利用三阶段腐蚀规律对海洋气候腐蚀条件下概率安全评定过程进行了修正. 以青岛港装船机主梁和翻车机端环为例进行了实际结构的安全评定分析计算,分别得出了这些结构中一些缺陷的确定性和概率安全评定结果. 2 种评定结果是大体上是相近的,但也存在一些不同. 通过对这些确定性和概率安全评定结果的对比分析,得到了确定性和概率性安全评定方法的初步关系式—近似为单对数线性关系,此结论为概率安全评定方法的工程化奠定了基础.

关 键 词: 概率安全评定; 钢结构; 疲劳; 腐蚀

中图分类号: O 213

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)08-0925-05

Investigation of probabilistic safety assessment for in-service mechanical equipment steel structures

Luo Hongyun Zhong Qunpeng Zhang Zheng

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the safety assessment problem of large-scale in-service mechanical equipments' steel structure , the probabilistic safety assessment method was proposed under the dead load and fatigue conditions with the aid of second level method and Monte Carlo method. Amended equation of it was established according to the three-period corrosion law in consider of corrosion lost under marine environment with which the ship loader bridge and wagon tipper in Qingdao Port were calculated and analyzed. Both definite safety assessment and the probabilistic safety assessment results were obtained. The results from the two assessment methods were generally closed but still there was little difference between them. The primary relation-approximately logarithm relationship, between the definite safety assessment and the probabilistic safety assessment was obtained from the comparative investment between the results of two kinds of assessment methods. The relationship obtained is the key point for the effectively application of the concerned probabilistic safety assessment method to in-service mechanical equipments' steel structure.

Key words: probabilistic safety assessment; steel structures; fatigue; corrosion

近年来,随着我国经济的快速发展,国内各生产任务量也逐年增加,设备使用率不断提高(有的设备使用率超过 80%). 由于使用时间的增加(如很大部分的港口设备已经运行 10 ~ 15 a 以上)和任务量的加重等原因,它们相继出现了不同程度的损伤,如起重机的臂架、支撑圆筒等结构的断裂等,甚至出现过较大的安全事故,不仅造成重大经济损失,人员伤亡,给企业的安全生产带来

收稿日期: 2004-04-02

基金项目: 院士行资助项目

作者简介: 骆红云(1970-),女,山东海阳人,博士后, luo7128@163.com.

严重威胁,同时还造成了较大的负面国际影响. 若对这类设备进行报废或全部更新是不经济的,也不符合国情. 这些设备属于大型特种机械设备,尽管国家规定要对特种设备进行安全管理,但对这些在役机械特种设备究竟应该如何进行科学的安全评定、监控以及合理的延寿[1],目前国内还未有成型的办法和思路. 为此进行了安全评定方法特别是概率安全评定方法的研究.

而近年来国内外对锅炉压力容器、压力管道(包括核容器核管道)等设备的安全评定方面作了比较多的工作[2,3],但其成果不能完全套用在这些大型机械设备上. 因此本文以现有的弹塑性安全评定的研究成果为基础,考虑到钢结构的特殊性,对其进行了静载和疲劳载荷条件下的概率安全评定方法研究,并对海洋气候下腐蚀情况的概率安全评定方法进行了修正. 最终以港口装船机主梁和翻车机端环为例进行了实际结构的概率安全评定计算分析,给出了这些结构不同位置缺陷的安全裕度和失效率,并讨论了确定性和概率安全评定的初步关系.

1 概率安全评定方法

通过概率安全评定方法可以计算出含缺陷构件的可靠度或失效率. 一般来说失效率可以采用 3 种方法计算:积分法、第二水平法和 Monte Carlo 法. 通过对这 3 种方法的归纳总结可以得知,积分法需要大量的先验信息,并且只能通过近似计算得到数值解;Monte Carlo 法需要信息量相对较少,计算方法简单,但往往需要进行上百万次的模拟,才能获得一次“命中”,所以运行成本很高;而第二水平法则兼具二者的优点,又避免了其二者的不足之处,即需要的信息量相对较少,计算复杂程度相对适中,解的精度能够满足工程的需要,运行成本低,因此这里综合运用第二水平法和 Monte Carlo 法对构件的失效率进行计算.

在评定过程中许多数据都具有一定的随机性和不确定性,如缺陷表征尺寸参数、材料机械性能参数、构件自身形状尺寸参数、以及外载荷等参数. 研究表明,这些参数的不确定性一般服从一定的统计分布规律[4],可以通过统计的方法描述.

为了能够较真实的反映设备运行过程中的不确定性和随机性,分别对含缺陷钢结构进行了静载下和疲劳载荷下概率安全评定的研究工作.

1.1 静载下结构的概率安全评定

1) 各参数的确定

首先通过各种检测手段(或查阅资料和有限元计算分析)确定各参量的值(包括确定性参数和随机参数),然后采用以 弹塑性 J 积分为理论基础的双参数法计算 K_r,L_r 值,并重复 n 次,得到 $L_{r1},L_{r2},\cdots,L_{ri},\cdots,L_{rn}$ 以及 $K_{r1},K_{r2},\cdots,K_{ri},\cdots,K_{rn}$ 的值,然后对其进行统计分析[5]:

L_r 的均值为

$$u_L=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}L_{ri} \tag{1}$$

L_r 的变异系数为

$$v_L=\frac{\sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(L_{ri}-u_L)^2}}{u_L} \tag{2}$$

K_r 的均值为

$$u_K=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K_{ri} \tag{3}$$

K_r 的变异系数为

$$v_K=\frac{\sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(K_{ri}-u_K)^2}}{u_K} \tag{4}$$

L_r 和 K_r 的相关系数为 ζ_{LK}

$$\zeta_{LK}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_{ri}-u_K)(L_{ri}-u_L)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(K_{ri}-u_K)^2\sum_{i=1}^{n}(L_{ri}-u_L)^2}} \tag{5}$$

采用柯尔莫哥洛夫检验法来确定 L_r 和 K_r 的分布形式. 经检验发现它们基本上服从正态分布[4~6],这与众多因素的随机变量一般服从正态分布的数理统计经验是一致的.

2) 失效率的计算

以 L_r 和 K_r 为基本变量,广义安全裕度 $p^*(L_r,K_r)$ 为:当 $L_r<L_r^{\max}$ 时,

$$p^*(L_r,K_r)=(1-0.14L_r^2)[0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6)]-K_r$$

当 $L_r\geqslant L_r^{\max}$ 时,

$$p^*(L_r,K_r)=0 \tag{6}$$

由于 L_r 和 K_r 服从正态分布,所以有 L_r 和 K_r 的联合分布概率密度函数 $H_{LK}(L_r,K_r)$ 为

$$H_{LK}(L_r,K_r)=\frac{\exp\left\{-\left[\left(\dfrac{L_r-u_L}{u_Lv_L}\right)-2\zeta_{L_r,K_r}\dfrac{L_r-u_L}{u_Lv_L}\dfrac{K_r-u_K}{u_Kv_K}+\left(\dfrac{K_r-u_K}{u_Kv_K}\right)^2\right]\Big/[2(1-\zeta_{LK}^2)]\right\}}{2\pi u_Lv_Lu_Kv_K\sqrt{1-\zeta_{LK}^2}} \tag{7}$$

由此可得广义失效率为:

$$F^* = 1 - \int_0^{L_r^{\max}(1-0.14L_r^2)[0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6)]} \int_0^{L_r^{\max}(1-0.14L_r^2)[0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6)]} H_{LK}\mathrm{d}L_r K_r \tag{8}$$

由于式(8)没有解析解,因此采用第二水平法计算失效率:

首先计算 $L_r<L_r^{\max}$ 的概率 q_1. 由上可知,L_r 服从正态分布,因此有

$$q_1 = \Phi\left(\frac{L_r^{\max} - u_{L_r}}{u_{L_r} v_{L_r}}\right) \tag{9}$$

其中,Φ 为标准正态分布的分布函数,是增函数,所以当 L_r 的均值或变异系数增加时,q_1 减小;

然后计算 $L_r<L_r^{\max}$ 时的广义失效率 q_2.

设 $\boldsymbol{D}_{LK}$ 为 L_r 和 K_r 的协方差矩阵

$$\boldsymbol{D}_{LK} = \begin{bmatrix} (u_L v_L)^2 & u_L v_L u_K v_K \zeta_{LK} \\ u_L v_L u_K v_K \zeta_{LK} & (u_K v_K)^2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$\boldsymbol{D}_{LK}^{-1}$ 为其逆矩阵,可靠性指标 β 为

$$\beta = \min_{\substack{p^*(L_r,K_r)=(1-0.14L_r^2)[0.3+\\ 0.7\exp(-0.65L_r^6)]-K_r)=0}} \left\{ \begin{bmatrix} L_r - u_L \\ K_r - u_K \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{D}_{LK}^{-1} [L_r - u_L, K_r - u_K] \right\}^{1/2} \tag{11}$$

通常可以采用一阶二次矩迭代法求解上式,但由于其表达式较复杂,常用的迭代法都不收敛. 由分析可知,式(11)是有约束的双变量数学规划问题. 因此这里采用数学规划法进行求解[7]. 通过计算可得 $L_r<L_r^{\max}$ 时的广义失效率 q_2:

$$q_2 = 1 - \Phi(\beta) \tag{12}$$

最后计算失效率 F^*. 由全概率公式有,广义失效率 F^* 为

$$F^* = q_1 q_2 + (1 - q_1) \tag{13}$$

1.2　疲劳条件下结构的概率安全评定

在描述疲劳裂纹扩展的不确定性时,不仅要考虑到裂纹尺寸的不确定性,同时还应根据具体情况采用随机变量来描述疲劳裂纹扩展规律. 这里采用了 2 个随机变量描述疲劳裂纹扩展规律.

1) 采用 2 个随机变量描述疲劳裂纹扩展规律

在研究疲劳裂纹扩展过程中,Paris 公式是较常用的分析计算公式,

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = C(\Delta K)^n \tag{14}$$

将公式中的 2 个常数 C,n 都看作是随机变量. 研究表明变量 C,n 服从对数正态分布或正态分布[4].

为计算方便,取 C,n 服从正态分布,于是有

$$C_q = \mu_q + \mu_q \sigma_c$$
$$n_q = \mu_n + \mu_q \sigma_n$$

其中,μ_q 为标准正态分布关于 q 的下侧分位数. 因此有在给定概率 q 的条件下,疲劳裂纹扩展速率为

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = C_q(\Delta K)^{n_q} \tag{15}$$

2) 统计变量计算

同静载下概率安全评定的过程相似,首先选取确定性参数,并随机抽取随机变量的值,然后根据以弹塑性 J 积分为理论基础的双参数法计算裂纹的最终尺寸. 具体过程如下:设裂纹的初始长半轴为 c_0,短半轴为 a_0,埋藏裂纹与最近表面的距离的初始值为 p_0. 将裂纹的扩展过程按应力循环第 i 段的裂纹尺寸计算裂纹尖端的应力强度次数 N 分为 N 份. 在第 $i+1$ 段,可用因子的变化幅度 $\Delta K_{c_{i+1}}$ 和 $\Delta K_{a_{i+1}}$ 来表示描述裂纹扩展的情况,设 ΔK_{th} 为裂纹扩展的门槛值,则

$$\Delta K_{c_{i+1}} > \Delta K_{\mathrm{th}} \tag{16}$$

则

$$c_{i+1} = c_i + C_q(\Delta K)^{n_q} \tag{17}$$

若

$$\Delta K_{a_{i+1}} > \Delta K_{\mathrm{th}} \tag{18}$$

对表面裂纹有

$$a_{i+1} = a_i + C_q(\Delta K)^{n_q} \tag{19}$$

对埋藏裂纹有

$$\left.\begin{aligned} a_{i+1} &= a_i + C_q(\Delta K)^{n_q} \\ p_{i+1} &= p_i + C_q(\Delta K)^{n_q} \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

且有若 $p_{i+1}>0.8a_{i+1}$ 则埋藏裂纹需重新表征为表面裂纹,并在以后按表面裂纹计算.

计算出裂纹最终长半轴 c_f 和最终短半轴 a_f 和埋藏裂纹与最近表面的距离 p_f. 并重复 n 次,进行统计分析,求出 c_f 的均值 u_{c_f},变异系数 v_{c_f} 及 p_f 的均值 u_{p_f},变异系数 v_{p_f},a_f 的均值 u_{a_f},变异系数 v_{a_f},并用柯尔莫哥洛夫检验法确定 c_f 和 $a_f(p_f)$ 的分布形式. 通常 c_f 和 $a_f(p_f)$ 服从正态分布或对数正态分布.

3) 广义断裂和塑性破坏失效率的计算

由前面的计算可知,L_r 和 K_r 基本上服从正态分布,可用前面静载下概率安全评定的方法计算广义失效率 F^*.

2　海洋气候腐蚀情况的修正

除了参数和性能的不确定性以外,还应考虑

腐蚀情况对所评定的钢结构的影响. 因此根据对海洋环境下碳钢、低合金钢大气腐蚀的研究成果[8](通过对碳钢、低合金钢长期大气腐蚀锈层生长历程的研究,利用 Fick 扩散定律而得出了碳钢、低合金钢大气腐蚀的数学模型,即 3 个阶段的复合模型的腐蚀规律),对所评的钢结构厚度尺寸进行了修正. 3 个阶段的复合模型的腐蚀规律表明,在腐蚀的第一阶段用线性规律比较合适;第二阶段采用了数学模型中的抛物线规律,拟合结果表明抛物线拟合精度高于传统的幂函数拟合的精度;第三阶段也用线性规律. 3 个阶段的腐蚀规律如下图 1 所示.

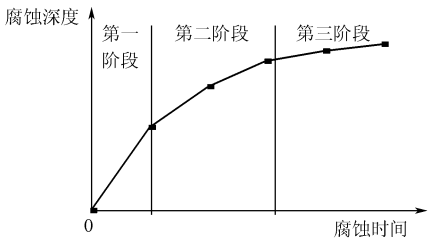


图 1 碳钢、低合金钢大气腐蚀示意图

根据所查数据表明,对于碳钢、低合金钢材料(尤其是 A3 钢,16Mn 等材料),在青岛大气情况下 8 年总的腐蚀减薄(平均)不超过 0. 3 mm,超过 8 年后,由于腐蚀进入第三阶段,腐蚀率下降,每年的腐蚀减薄率不超过 0. 025. 根据以上分析,对概率评定过程进行了修正. 并以青岛港装船机主梁和翻车机端环为例进行了概率安全评定.

3 计算实例

根据现场缺陷的实际测试(声发射检测和超声波检测)结果、有限元应力计算结果(见表 1)、及有关的材料性能参数(见表 2)(其中翻车机端环材料为 A3 钢,其缺陷编号为 *B*12、*B*2、*E*1、*E*3;装船机主梁材料为 16MnR,缺陷编号为 *A*1、*B*1)和前面部分概率安全评定及腐蚀情况修正等方法进行计算分析,得出了装船机主梁和翻车机端环部分缺陷的确定性安全评定(安全裕度)和概率安全评定(失效率)[8]结果,见表 1 和表 3.

通过对确定性安全评定(安全裕度)和概率安全评定结果(失效率)的比较(表 1)可以看出,在很大程度上这 2 种评定方法的结论是相近的,即当概率评定的失效率很小时,确定性安全评定的安全裕度较大,而失效率较大时,安全裕度较小,但也出现了安全裕度较大时,失效率也偏大的情况,如表 1 中缺陷 *A*1 的评定结果.

表 1 装船机主梁及翻车机端环缺陷概率安全评定结果

缺陷编号	缺陷尺寸/mm			应力/MPa		失效率	安全裕度
	c	*a*	p_1	最大应力	最大应力变化范围		
*B*2	40	2	6	160	192	4.58×10^{-13}	1. 08
*B*12	90	2	1	140	160	3.28×10^{-26}	1. 12
*E*1	40	2	8	137	157	0	1. 24
*E*3	70	2	4	110	160	0	1. 40
*A*1	40	2	4	180	170	0. 019	1. 17
*B*1	30	2	5	1	80	0	4. 36

表 2 2 种材料的相关物理及力学性能

力学性能 材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
A3	209 000	0. 3	235	375
16Mn	209 000	0. 3	345	480

表 3 疲劳和腐蚀条件下的概率评估结果修正

缺陷编号	(原)循环次数 *N*	修正后循环次数 *N*	失效率
*B*2	5 000	2 500	$3.221\ 14\times10^{-36}$
*B*12	5 000	5 000	$2.007\ 97\times10^{-25}$
*E*1	>100 000	100 000	0
*E*3	80 000	65 000	0
*A*1	3 000	3 000	$1.019\ 75\times10^{-40}$
*B*1	50 000	50 000	0

该对比结果说明:1)确定性安全评定的结果是可信的,但对客观事物的描述不够真实(如随机性),因此与概率安全评定有偏离;2)2 种评定方法有一定的关系(或联系),又有区别.

研究发现概率安全评定虽然能够反映客观机械结构中存在的不确定性和随机性,但需要大量的数据作计算的基础,因此在真正的工程实践中,比较难以实现;而确定性安全评定方法已经逐步走向工程化,有可实施性,却又与实际结果有一定的偏离,因此如何才能发挥二者的优点,避其缺点是当今工程界的一个重要课题. 为此对二者的关系进行了初步探讨.

表 3 给出了考虑疲劳和海洋环境腐蚀情况后根据前面分析计算的疲劳失效率和使用循环次数的修正结果及确定性安全评估的计算结果(即表 3 中(原)循环次数 *N*).

通过二者的比较可以看出,在很大程度上这 2 种评定方法的结论是相近的,但也有个别情况,修正后的循环次数与确定性安全评定的计算结果不同,如表 3 中 *B*2 和 *E*3 缺陷的评定结果.

该对比结果说明确定性安全评定的结果是可信的,但与概率安全评定有偏离. 根据安全性原则,建议同时参考 2 种评定结果,并在安全性要求较高的场合以二者的偏安全的结论为准.

4 2 种评定结果的初步对比分析

从前面的分析可知,确定性和概率安全评定结果可能存在着某种关系,为了能够在生产实际

当中充分发挥其二者的优点,我们分别采用 2 种评定方法对实际的港口大型机械钢结构进行了大量的评定,并对其二者的评定结果进行了初步分析. 分析结果如图 2 示.

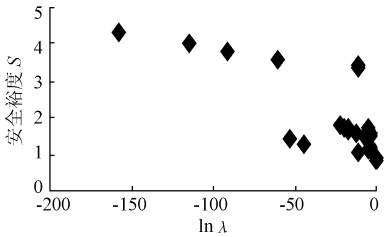


图 2　安全裕度 S 与失效率 λ 的关系图

图 2 示为安全裕度 S(确定性安全评定结果)与失效率 λ(概率安全评定结果)的对数值之间的关系图. 由图可见其二者大体上为线性关系,即有

$$S = A\ln\lambda + B \qquad (20)$$

其中,λ 为失效率;A,B 为系数;S 为安全裕度. 由式(20)所表述的确定性与概率安全评定结果之间的关系,可以在今后的安全评定过程中,不必完全按概率安全评定的要求,对所有随机变量都进行大量的检测,而只需要进行部分检测,然后根据二者的关系来确定一些参数,进而进行准概率安全评定,这样就能充分发挥二者的优势,既满足工程需要又可以节省大量的时间和经费.

当然,这只是对上述二者关系的初步探讨,我们还将对其进行更加深入和细致的工作,以便实现概率安全评定的真正工程化.

5　结　论

1) 进行了静载和疲劳载荷条件下的概率安全评定方法研究,其中对静载下钢结构缺陷的概率安全评定主要采用第二水平法和 Monte Carlo 法相结合的办法计算其失效率;疲劳概率安全评定中还采用了 2 个随机变量描述疲劳裂纹扩展规律,计算疲劳寿命;

2) 用三阶段腐蚀规律对海洋气候下概率安全评定方法进行了修正;

3) 以青岛港装船机和装船机为例进行了实际结构的概率安全评定计算分析,给出了装船机主梁和翻车机端环一些缺陷的确定性和概率安全评定结果;

4) 对确定性和概率安全评定结果进行了分析,得到了 2 种方法评定结果的初步关系式,为概率安全评定方法的工程化奠定了基础.

参考文献 (**References**)

[1] 刘　刚,肖汉斌,潘春旭. 起重机金属结构安全评价的现代分析理论与方法[J]. 水利电力机械,1996,18(6):4 ~ 8
Liu Gang, Xiao Hanbin, Pan Chunxu. Modern analysis theory and method of safety assessment of crane metal structure[J]. Water Conservancy and Electric Power Mechanic, 1996,18(6): 4 ~ 8(in Chinese)

[2] Bullough R, Green V R, Tomkins B, *et al*. A review of methods and applications of reliability analysis for structural integrity of UK nuclear plant [J]. Pressure Vessels and Piping,1999,76: 909 ~ 919

[3] SAPV-95,含缺陷压力容器安全评定[S]
SAPV-95, Safety assessment for in-service pressure vessels containing defects[S] (in Chinese)

[4] 金　星. 工程断裂失效概率分析和评估方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学材料科学与工程学院,1996
Jin Xing . Probabilistic analysis and assessment of failure of engineering structures[D]. Beijing: School of Material Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996(in Chinese)

[5] 左尚志. 在用压力管道可靠性安全评估及安全等级评定技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学材料科学与工程学院,1999
Zuo Shangzhi. Study on reliability safety assessment and safety grade assessment technology for in-service Pressure pipe[D]. Beijing: School of Material Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,1999(in Chinese)

[6] 张骏华. 结构可靠性分析[M]. 北京:宇航出版社,1989. 35 ~ 37
Zhang Junhua. Structure reliability analysis[M]. Beijing: Yuhang Press,1989. 35 ~ 37(in Chinese)

[7] 魏权龄,王日爽,徐　兵. 数学规划引论[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1991. 194 ~ 205
Wei Quanling, Wang Rishuang, Xu bing. Mathematical programming[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,1991. 194 ~ 205 (in Chinese)

[8] 王景茹,张　峥,朱立群,等. 碳钢、低合金钢大气腐蚀数学模型研究[J]. 航空材料学报,2004,24(1):41 ~ 46
Wang Jingru, Zhang Zheng, Zhu Liqun, *et al*. Research on mathematical model of carbon steel and low alloy steel in atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials,2004,24(1):41 ~ 46 (in Chinese)