

# 钢结构海洋平台整体安全性评估方法研究

申仲翰 许滨 赵强 吕聪  
(中国科学院力学所)

**摘要** 本文针对钢结构海洋平台整体安全问题,采用多级评估原理,将平台的承载能力和预后结果作了综合研究。从而既可在结构的整体强度性能方面进行深入分析,又在经济损失方面作了全面考虑,是一种切合工程需要和兼顾社会责任的合理评估方法。

**关键词** 整体安全评估 整体强度 预后结果

## 一、引言

运行中的海洋平台经常处于风浪流冰、海水腐蚀及海生物增长等自然因素的影响下,同时受到钻井、靠船、直升机起落等机械碰撞,在如上所述的综合干扰下,平台的安全性能将因结构损伤而变化,对它的正确认识及合理评估是运行中的重要关键,有关研究内容已成为近年来海工科研工作中的热门课题<sup>[1][2]</sup>。

就广义而论,平台的安全评估涉及了三个重要概念,一是整体强度。由于海洋平台强度设计的保守性,众多的斜撑使其结构呈现高度静不定,从而局部强度校核已不能确切表达安全的实质性内容,而必须建立整体强度的概念。二是将平台承载能力和预后结果的综合作为安全指标,如此研究方法既在结构的强度性能方面进行了深入分析,又在经济损失方面做了全面考虑,是一种切合工程需要又兼顾社会责任的研究方法。三是多级评估<sup>[3]</sup>,其中心思想是将安全评估方法从粗到细,从简单到复杂排成一个等级序列,对于储备强度较高的平台,或接近损坏的平台可在初级评估中得出结论,而对损伤较严重,但又不打算轻易放弃并准备在检修后继续使用的对象则需进行高级评估,这对大量平台群体的定期评估工作很有意义,它显示了准确有效和经济可靠的特点。

## 二、评估系统的基本原理

在本研究项目中所用的基本评估原理是将平台本身的安全归纳为两种基本因素。一是结构本身承担运行任务的能力,这里称为结构能力,另一种则是平台倒塌可能引起的经济后果。前者着重考虑平台的整体强度性能,后者则考虑事故发生后的经济损失及社会影响等。

结构能力是指平台最终极限状态的承载能力,其指标为储备强度比率 RSR

$$RSR = \frac{\text{平台极限承载力 } R_u}{\text{平台最小参考力 } S_r} \quad (1)$$

这里  $R_u$  为极限强度,它是招致平台倒塌的临界水平载荷,称为最大承载力,超过这一荷载,则平台进入整体失稳,即屈服状态。对于同一平台来说,其完整无损时承载力大,有了损伤之后,其承载力下降。 $S_r$  是平台实际承受载荷的参考值,其与平台的设计寿命有关,是平台设计的服役期限内可能遭受的总侧向载荷的名义值,显然它将随着设计服役期的加长而增大,如对风浪载荷来说可分为十年一遇,五十年一遇,百年一遇等不同等次。另外

$S_r$  的取值还与平台水深有关, 对于 30 米以下水深的浅水平台以基础剪力为主, 对于水深在 30 米以上的平台则参照倾覆力矩的大小而确定  $S_r$ 。一般说 RSR 的值是随平台的不同状态而变化的, 从某种意义上看, 它等值于传统的安全因子。对于现行标准设计的新平台而言, 该值在 1.5—2.5 之间变化, 对于运行较长时间的平台来说, RSR 之值反映了平台的剩余强度性能。

倒塌后果主要由维修花费和倒塌损失两项经济指标加以衡量<sup>[4]</sup>。其中倒塌损失记作  $C_r$ , 它主要包括人员伤亡、财产损失(倒塌后的平台造价)、环境污染和资

源浪费等内容。维修花费记作  $C_i$ , 它可看作是一种初始花费, 主要包括对损伤平台实施修理及维护的投入。这样总的倒塌后果记作

$$C = C_i + C_r \quad (2)$$

一般说, 倒塌后果可由平台的结构形式、组成、用途等内容不同而加以不同等次的区分, 对于那些造价很高、生产、生活及储油设施集中在一起的平台, 应考虑高后果值, 例如目前运行在南海的涠 11—4A 平台即属于这一类, 相反对于涠 11—4B 平台, 只设采油井架, 没有生活设施, 风险就比较小, 可采取低后果值, 其他情况将放在中间档次。储备强度与后果之间呈二维关系, (见图 1), 后果分析贯穿于各级评估之中, 这将在简单定量评估中作重点介绍。

### 三、评估方法概述

如前所述, 为了适应大量平台的常规性安全检测需要, 本文采用了四级评估原理作为评估程序研制的基本方法, 随着评估等级由低到高的增长, 评估方式沿着由定性到定量,

由简单到复杂的趋势变化, 这样通过逐层筛选, 可以减少不必要的繁冗计算, 做到准确、合理、恰到好处。四级的分类是定性评估, 简单定量评估, 线性分析评估及非线性分析评估。下面针对每种情况作一简单说明(见图 2)。

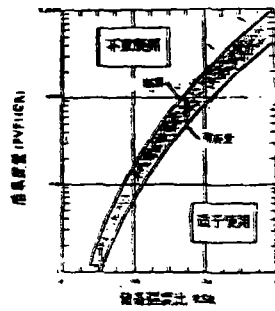


图 1 基于利益分析的安全性评估

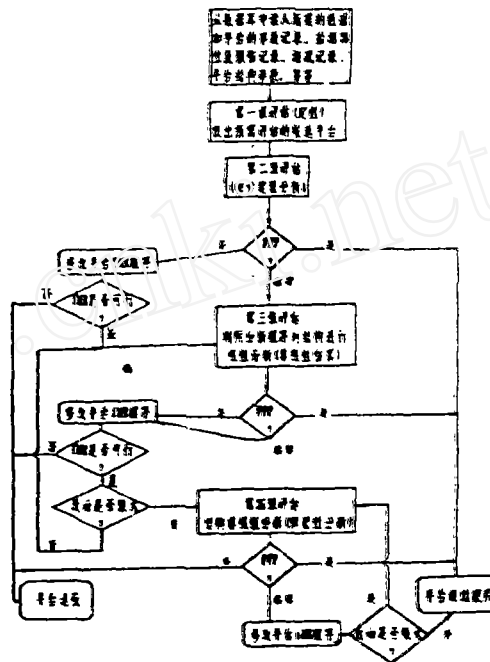


图 2 海洋平台安全性评估系统框图

## 1. 定性评估

本级评估主要用于对运行中的大量平台群体逐个进行初步试测,以尽可能缩小进行详细评估的范围而减少浪费。其主要筛选根据是平台类型和基本结构形式、服役年限、损坏程度、经济后果等内容。主要数据来源于海况参数、设计文件图纸、建造记录、损伤和定期维修记录及运行单位提供的检测—维护—修理想式。以下分别按照设计、建造及运行过程中的情况作一说明。

**设计阶段:**设计规范是否陈旧,有无不合理现象,综合性强度校核有无欠缺,如疲劳设计与使用寿命是否相符,杆件的细长比和壁厚是否合理,管节点是否得到加强,冲剪强度如何?甲板高度是否过低等。

**建造阶段:**主要指建造过程中加工工艺,材料选取及结构有无损伤等因素。如焊接温度是否合适,热处理情况如何?公差配合是否符合规范,管的焊缝质量是否达到要求?相邻两管之焊缝是否相差 $90^\circ$ ,钢材选取是否适当,构件的初始挠度、初始缺陷(可能是损伤所致)情况等等。

**运行阶段:**

(1) 运行环境:由于设计阶段对运行环境的估计不足,故在运行期间可能出现一系列不利因素。如实际水深是否超过设计水深,波浪撞击甲板情况是否严重,波流导致地基土壤移动状况,如堆积和淘蚀情况如何?平台运行期间与设计寿命比较,是否超期服役,在两次检修期间平台是否遭受到重大载荷的负担?如巨大风暴即为一例。

(2) 运行损伤:其中主要包括如下内容,如杆件的弯曲,凹陷和腐蚀乃至折断丢失,两次检修期间重大事故的发生,附着于结构的海生物增长,管节点及杆件上裂纹的出现,除次之外,还有桩腿拔出,甲板与桩腿脱离,桩腿主要管节点损坏等。

以上所谈的内容是对平台承载能力的定往概括,在实际评估中将根据上述内容,并考虑平台的类型、服役的年限、环境状况、运行的检测记录,按具体情况作不同处理,特别是结构之损伤,其不安全强度与发生部位关系很大。在招致承载力下降的种种因素中,将按设计、建造、运行之规范及专家的经验给出影响承载能力的系数,并进一步编制评估软件。

## 2. 简单定量评估

在现有平台的设计中,由于多种因素的作用,致使平台所受外载及平台本身的最大承载能力的预设计方面不能完全符合实际。例如风浪参数的确定, Morison 公式在管群结构中的适用性,海生物的生长速度等等,都将使设计载荷与实际外载有很大出入;在平台承载力估算中,材料特性,管节点焊接工艺等因素又使平台的实际承载力难于做出精确的分析。因此在本级评估中,RSR的取值是根据总结多组平台的运行和检测记录而得出的经验公式所决定的。本节着重讨论平台承载能力与潜在经济后果。<sup>[9][16]</sup>

(1) 储备强度率分析

$$RSR = FR \exp(\beta\sigma) \quad (3)$$

$$\sigma = (\sigma_l^2 + \sigma_r^2)^{1/2} \quad (4)$$

其中 $\sigma_l$ 和 $\sigma_r$ 分别代表波浪外载和平台承载能力的对数分布标准偏差,它们将由海况参数及平台初始设计及重新改造的具体资料而获得。 $\beta$ 为安全指数,它是平台的可靠性度量,FR为力率,它可写作

$$FR = S/S_r \quad (5)$$

$S_r$  为参考力, 它是作用在平台上的总横向载荷的名义值, 可根据现行设计指南或根据设计一座等值新平台所需载荷而最终确定,  $S$  代表一般年度平台所受最大期望横向载荷, 它是最大波高的函数

$$S = K_d K_i (H_m)^\alpha \quad (6)$$

这里  $K_d$  为水动力系数,  $K_i$  为波一流动力总合系数,  $H_m$  为最大波高,  $\alpha$  为波高指数, 当水的动拖曳阻力占优势时,  $\alpha$  值取在 2 的范围内。

由公式 (3) 可知, 为了求得 RSR, 必须知道安全系数  $\beta$  的值, 为此需要建立  $\beta$  与平台破坏的年或然率  $P_f$  之间的关系

$$P_f = 1 - \Phi[\beta] \quad (7)$$

这里  $\Phi$  是算子, 它表示对变量  $[\bullet]$  的标准累积正态分布, 当  $\beta$  之值是在  $(1 < \beta < 3)$  的范围内时, 可近似地将  $\beta$  和  $P_f$  连系起来, 得出

$$P_f = 0.475 \exp(-\beta^{1.5}) \quad \text{或} \quad \beta = [-\ln(2.105 P_f)]^{0.625} \quad (8)$$

至此可知平台储备强度率 RSR 将与如下参数有关, 即  $K_d$ 、 $K_i$ 、 $H_m$ 、 $\alpha$ 、 $S_r$ 、 $P_f$ 、 $\sigma_f$ 、 $\sigma_r$  等量, 而这些参数的确定将涉及到平台所处海域的海况记录, 平台设计建造的各种规范及有关资料, 以及从事平台的设计、建造、运行、维护等业务的各类专家的工作经验。对于新平台的设计可由上述参量与 RSR 的关系中进行整体储备强度的分析校核。对于运行中已发生损伤的平台将可针对它的整体剩余强度作出合理的估算。

#### (2) 潜在后果的分析:

在花费与利益的评价中, 主要采用如下公式作为分析的基础, 即由期望的初始费用  $E(C_i)$  和期望未来费用  $E(C_f)$  组成的期望总体费用  $E(C)$  达到最小, 即

$$\min E(C) = \min \{E(C_i) + E(C_f)\} \quad (9)$$

初始费用  $C_i$  主要指新平台设计或已运行平台的重新鉴定方案所需的费用, 简捷来说, 对于运行已久的平台, 为达到一定安全度所花一次性修理费用将是初始费用的主要内容, 显然它将直接关联着平台年损伤或然率的大小。未来费用  $C_f$  主要指与特殊操作、常规性维修方案及风险等内容相关的各种费用, 这里风险费用包括因故障造成之生产延期损失, 财产损失, 环境污染, 人员生命损失等诸项条款。

如上所述未来花费的期望值与平台事故紧密相关, 故可写成为如下表达式

$$E(C_f) = C_f(P_f)(PVF) \quad (10)$$

这里  $P_f$  为平台事故的年或然率, PVF 称为现代值函数, 它的作用是将潜在的将来花费折成当前值

$$PVF = [1 - (1 + r - q)^{-L}] / (r - q) \quad (11)$$

这里  $L$  表示平台已服役年限, 以年为单位,  $r$  为纯折合率 (或为投资回报率),  $q$  为通货膨胀率。

未来花费  $C_f$  可由前面叙述的内容写成如下表达式

$$C_t = C_m + C_{p1} + C_{p2} + C_e + C_i \quad (12)$$

上式中,  $C_m$  代表日常维修费,  $C_{p1}$  为生产损失费,  $C_{p2}$  为财产损失费,  $C_e$  为环境及资源损失费,  $C_i$  为人员生命损失费, 它是每人之经济利益  $A$  与人员伤亡总数  $n$  的乘积, 即  $C_i = A \cdot n$ 。

初始费用  $C_i$  的预算与平台评估中的检修方案有关, 其可写作如下形式

$$C_i = C_0 + \Delta C \log_{10} P_f \quad (13)$$

这里  $C_0$  是用于控制平台损伤或然率而支出的费用, 它的应用将使损伤或然率降至最小。  $\Delta C$  为初始费用曲线之斜率 (见图 3), 一般取平台损伤或然率降至原始值的 1/10 时所需的费用作为  $\Delta C$  的值, 由曲线可知, 平台损伤或然率  $P_f$  愈小所需的初始费用  $C_i$  愈高。

将公式 (10) 及 (13) 代入公式 (9), 并对  $P_f$  取微分可求出与最小总费用相应的年损伤或然率值  $P_{f0}$

$$P_{f0} = 0.435/[PVF \times CR] \quad (14)$$

这里  $CR = C_t/\Delta C$

由上述分析可知平台的未来花费包括了平台倒塌后的一切损失, 所以它应是总体花费中的主要部分。

### 3 线性评估

通过二级评估后, 处于临界或不安全状态但又进行了加固修理的平台应进行第三级评估, 与二级评估相比, 本级的主要特点是在极限强度  $R_u$  的求法上前进了一步, 它将评估的整体结构用有限元方法进行了详细计算, 也就是在整体线弹性分析的基础上作定量分析而求得  $R_u$ , 并通过公式

$$RSR = R_u/S_r$$

计算储备强度率。如前所述  $S_r$  为参考力, 其定义和求解方法与二级评估中相同,  $R_u$  的求解是采取逐步加载方式, 通过对临界构件的非线性规律进行模拟, 从而以线弹性计算程序求得平台结构整体非线性屈服过程。这一方法在文献 [7] 中已作了明确的论述, 根据这一方法本研究项目以 ADINA 为母体程序与非线性仿真计算单元相结合, 解决了平台结构整体屈曲倒塌载荷的计算问题 [8]。并以 8 号平台为例作了实际计算 [9]。有关后果分析的情况与二级评估相同, 此处不再赘述。

### 4 非线性评估

对具有重大应用价值和经济效益的平台, 在经过三级评估后尚不能作结论时, 则可进入四级评估。三级评估与四级评估的根本区别是这样的, 即对于平台结构整体屈服阶段中的弹性区域采取了不同的处理方法, 如三级评估中所述, 线性评估的实际作法是将非线性屈曲问题作了线性化处理, 因而解决方法是相对近似和粗略的, 但运算简单、经济; 而在四级评估中则是直接求解弹塑性问题, 在计算程序中使用了弹塑性梁单元、杆单元以及考虑桩土作用的非线性弹簧单元, 因此分析更加深入直接。除此之外一个完备的非线性评

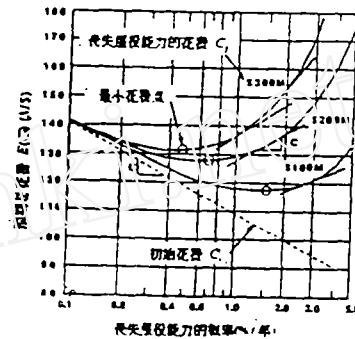


图 3 最小总花费评估

估程序尚需考虑对结构的后屈曲分析能力,以显示出结构的倒塌全过程。因此这级评估在程序编制工作上将会遇到更高的难度和付出更大的工作量。

#### 四. 评估系统的调用关系

平台整体安全性评估可通过上述方法编制成行之有效且使用方便的软件系统,它不仅涉及到结构强度及运行后果分析,而且需要完整的弹塑性结构计算程序作为支持软件,以及由平台的设计、建造、修理、环境条件、事故、检修、使用材料、资源、污染、财产等各种各样的参数构成的数据库。从而构成以评估机构为核心且有良好用户界面的软件包,基本情况可见图 [4] 所示之框图,它包含了评估系统的基本模块,并为平台安全评估所需专家系统的研制奠定了良好的基础。

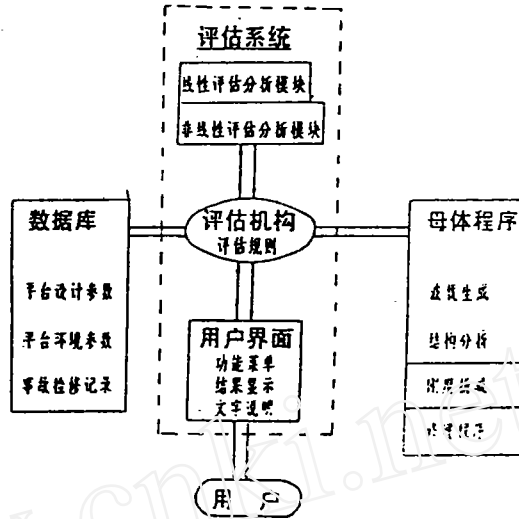


图 4 评估系统调用关系框图

#### 五. 结论与展望

1 按四级评估原理而编制的海上平台安全性评估程序应是当前从技术上最具科学性,从发展上最富生命力的一种软件系统,其中一级评估的作用是从众多平台中选取需要进行评估的对象,二级评估的特点是简单的定量评估,三、四级评估则是运用较为严格的强度分析手段求解平台的极限承载能力。其中四级评估最为完善,它可说明平台整体倒塌的全过程。

2 储备强度率与经济后果之间关系的建立是评估理论工作的重要内容。需在广泛收集有关资料的基础上建立符合我国国情的理论曲线。

3 在完善四级评估系统的基础上,建立实用有效的专家评估系统是该研究的理想技术路线。

4 非线性弹塑性仿真技术在评估系统中的应用将给平台设计与评估的决策者带来更大的方便。

#### 参考文献

- [1] Torgeir Moan, Ivar Holand "Risk Assessment of offshore Structures Experience and Principles" Proceeding of ICOSSAR'81, the 3rd International Conference on structural Safety and Reliability.

- [2] O.Fumes and P.E.KOHLER, "Safety of offshore platforms-Classification Rules and Lessons Learned" Marine and offshore Safety Proceeding of an International Conference, Sep, 1983, U.K.
- [3] R.K. Aggamal, R.G.Bea, "Development of a Methodology for Safety Assessment of Existing Steel Jacket offshore Platform" OTC6385 pp351-362
- [4] R.G.Bea and F.J.Pushar "Development of AIM Programs for Fixed and Mobile Platforms" OTS5703 pp193-205
- [5] R.G.Bea, "Reliability Criteria for New and Existing Platforms" OTC 6312 1990 pp393-408
- [6] R.G.Bea "Reliability Considerations in offshore Platform Criteria" Journal of the Structural Division", ASCE September, 1980 Vol.106 No. ST9 PP1835-1853
- [7] G.Stewart and J.W.Van " A Methodology for Platform Collapse Aralysis Based" OTC6311 PP381-391
- [8] 许滨, 申仲翰, "海洋导管架平台的极限强度分析", 力学所科研报告, 1993,6
- [9] 许滨, 申仲翰, 吕聪, "渤海八号导管架生产平台极限承载力分析", 力学所科研报告, 1993,9

www.cnki.net