

基于疲劳损伤和倒塌事故的导管架平台结构风险分析

刘 圆

(中国船级社海洋工程技术中心, 天津 300457)

摘 要: 基于风险的检验技术已成为海洋工程领域的研究热点, 其优势在于优化检验范围, 减少检验成本。通过有限元方法对导管架平台结构的疲劳损伤和倒塌失效进行数值计算, 并基于可靠性理论对平台结构关键构件的疲劳失效概率以及该构件疲劳破坏后平台结构的整体倒塌失效概率进行确定, 形成风险矩阵, 以制定相应的检验计划。在此基础上, 对南海某导管架平台结构进行了定量风险评估, 形成关键节点和构件的风险矩阵, 并给出了相应的检验目标以指导制定检验计划。本文工作可为导管架平台结构制定合理高效的检验计划, 在保障平台结构安全作业的同时降低运行费用。

关键词: 导管架平台结构; 基于风险的检验技术; 风险分析; 倒塌失效; 疲劳损伤

中图分类号: U674.38; O346.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2019)05-0650-06

1 引 言

我国海域面积广阔, 具有丰富的海洋资源, 尤其是油气石化资源, 导管架平台对于我国油气开发十分重要^[1]。导管架平台由于其特殊服役环境, 会遭受多种随机载荷的混合作用^[2], 且平台老龄化问题十分严峻, 因此结构安全一直深受业内的关注^[3,4]。导管架平台的结构检验工作对于保障平台结构安全十分重要, 然而无规划的检验会消耗极大的人力物力, 影响平台效益。因此, 基于风险的检验 RBI 技术成为了目前海洋工程领域关注的热点。

挪威船级社 DNV 首先将 RBI 技术引入石油化工领域, 针对储油设备进行了 RBI 的技术研发^[5]。随后, DNV 与美国石油学会 API 组织合作对 RBI 技术不断完善, 并颁布 API 581 标准《基于风险的检验方法》, 形成了完整的 RBI 方法体系^[6-8]。近年来, 国内基于 RBI 技术对船舶结构、管线设备进行了相关研究^[9-11]。目前, RBI 的研究对象也转向了导管架平台结构, 可针对导管架平台的倒塌失效和疲劳失效进行分析, 并制定相关的检验计划^[12-15]。同时, DNV 也开展了相关工作, 并基

于 RBI 技术开发了 ORBIT-ONSHORE 软件, 来指导固定式导管架结构的相关检验^[16]。我国从 20 世纪 80 年代就对船舶与海洋工程结构的疲劳可靠性分析进行研究, 形成了系统的分析体系^[17-18], 并进行了导管架平台结构的风险分析和延寿评估研究^[19]。然而, 采用 RBI 技术对导管架平台结构进行定量的风险评估并指导检验计划还需要进一步研究。

本文通过对导管架平台结构的疲劳分析和倒塌分析, 基于可靠性理论, 计算平台结构构件的疲劳失效概率以及部分构件疲劳破坏后平台整体的倒塌失效概率。在此基础上, 针对我国南海某导管架平台结构进行定量的风险评估, 形成关键节点和构件的风险矩阵, 进而制定相应的检验计划。

2 导管架结构的疲劳和倒塌失效概率分析

2.1 疲劳损伤等效模型

目前, 针对导管架平台的疲劳计算已经相当成熟, 采用波浪谱分析方法可以快速准确地计算分析平台结构的疲劳寿命。然而, 在进行疲劳失效概率的计算中, 需要考虑平台结构的长周期应力分布, 因此采用疲劳损伤等效方法进行分析。对于海洋结构, 通常可以假设平台结构的长周期应力分布为两参数的 Weibull 分布^[20], 即

$$F(S) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S}{q}\right)^h\right] \quad (1)$$

收稿日期: 2018-09-28; 修改稿收到日期: 2019-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金(41576179); 国家重点研发计划(2016YCF1401505)资助项目.

作者简介: 刘 圆(1977-), 男, 博士, 高级工程师
(E-mail: liuyuan@ccs.org.cn).

式中 q 为 Weibull 尺度参数, h 为 Weibull 形状参数, 对于导管架海洋平台, Weibull 形状参数 h 取值范围为 $0.8 \sim 1.0$; S 为长期应力范围。基于迈纳线性累积损伤准则, 假设疲劳损伤度基于单斜率 S-N 曲线计算, 则疲劳损伤度为

$$D(T) = T \cdot \frac{n}{a} q^m \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) \quad (T=1, 2, \dots, T_d) \quad (2)$$

式中 n 为应力范围的年平均作用次数, 取为 5×10^6 [20]; T 为服役时间, 单位为年; m 为双对数坐标下 S-N 直线的斜率, $\log_{10} a$ 为 S-N 曲线在 $\log_{10} N$ 轴上的截距; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

海洋平台结构的年平均累积疲劳损伤 D_0 为

$$D_0 = D(T)/T = (n/a) q^m \Gamma(1 + m/h) \quad (3)$$

2.2 疲劳失效概率计算模型

采用可靠性分析方法进行导管架平台疲劳失效概率分析, 可靠度指标 β 一般定义为

$$\beta = \mu / \sigma \quad (4)$$

式中 μ 和 σ 为极限状态方程的均值和标准差。可靠度指标 β 与结构疲劳失效概率的转换关系为

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f), \quad P_f = \Phi(-\beta) \quad (5, 6)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布的反函数。

针对导管架平台构件的疲劳失效概率, 定义极限状态方程 [21]

$$g(T) = \Delta - D(T) = \Delta - T \cdot (n/a) q^m \Gamma(1 + m/h) \quad (T=1, 2, \dots, T_d) \quad (7)$$

对式(7)两端取自然对数, 可以得到数学等效的极限状态方程为

$$g(T) = \ln \Delta - \ln [D(T)] \quad (T=1, 2, \dots, T_d) \quad (8)$$

由此, 极限状态方程进一步改写为

$$g(T) = \ln \Delta - \ln T - \ln n + \ln a - m \cdot \ln q - \ln \Gamma(1 + m/h) \quad (T=1, 2, \dots, T_d) \quad (9)$$

式中 变量 Δ 为随机变量, 服从对数正态分布, 其均值取 1.0, 变异系数一般取 0.3, 表示疲劳强度的不确定性 [21]; n 可设为随机变量, 且服从对数正态分布, 表示年应力范围作用次数的不确定性; a 和 q 均为随机变量, 且服从对数正态分布, 表示疲劳载荷的不确定性。

因随机变量 Δ , n 和 q 均服从对数正态分布, 则 $\ln \Delta$, $\ln n$ 和 $\ln q$ 均服从正态分布, 由此可看出, $g(T)$ 也服从正态分布, 可靠度指标可根据式(10)进行计算,

$$\beta = \mu_g / \sigma_g \quad (10)$$

式中 μ_g 和 σ_g 为 g 的均值和标准差, 有

$$\mu_g = \mu_{\ln \Delta} - \ln T - \mu_{\ln n} + \mu_{\ln a} - m \cdot \mu_{\ln q} - \ln [\Gamma(1 + m/h)] \quad (11)$$

$$\sigma_g^2 = \sigma_{\ln \Delta}^2 + \sigma_{\ln n}^2 + \sigma_{\ln a}^2 + m^2 \sigma_{\ln q}^2 \quad (12)$$

对数正态分布随机变量 X 与正态分布的随机变量 $\ln X$ 的均值和标准差有如下关系,

$$\mu_{\ln X} = \ln \left[\frac{\mu_X}{\sqrt{1 + \delta_X^2}} \right], \quad \sigma_{\ln X} = \sqrt{\ln(1 + \delta_X^2)} \quad (13)$$

式中 $\mu_{\ln X}$ 和 $\sigma_{\ln X}$ 分别表示 $\ln X$ 的均值和标准差; μ_X 和 δ_X 分别表示 X 的均值和变异系数。

2.3 平台结构倒塌失效概率模型

通过非线性倒塌分析可以得到平台结构的极限承载能力 [22]。定义储备强度比 RSR 为

$$RSR = Q_l / Q_d \quad (14)$$

式中 Q_d 为设计水平载荷, 是平台设计阶段根据环境载荷制定的; Q_l 为平台极限水平荷载, 表示导管架平台的抗力。导管架结构的倒塌失效概率 P_f 为环境载荷 E 超过结构抗力 RSR 的概率, 即

$$P_f = P(RSR < E) = \int_0^\infty P_E(E) p_{RSR}(E) dE \quad (15)$$

导管架平台的结构抗力 RSR 可以近似为正态分布, 其概率密度函数 $p_{RSR}(RSR)$ 为

$$p_{RSR}(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_R} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{RSR - R_m}{\sigma_R} \right)^2 \right] \quad (16)$$

式中 R_m 为 RSR 的均值, σ_R 为 RSR 的标准差, $\sigma_R = V_R R_m$, 其中 V_R 为结构抗力的变异系数, 定义为

$$V_R = V_C / \sqrt{n} \quad (17)$$

式中 V_C 为导管架构件压缩或拉伸强度的变异系数, 一般取 $V_C = 10\%$ [22]; n 为结构倒塌时参与破坏的构件数量。

导管架平台的环境载荷影响通过无量纲年超越概率 $P_E(E)$ 进行表述, 为指数分布函数, 即 [22]

$$P_E(E) = \exp[-(E - A)/B] \quad (18)$$

式中 $E = E_{RP} / E_{100}$, E_{RP} 为 RP 年重现期的环境载荷产生的基底剪力, E_{100} 为 100 年重现期的环境载荷产生的基底剪力, $E > A$; 系数 A 和 B 是表征环境载荷分布的特征参数。不同海域中, 环境载荷的长期分布存在一定差异, 因此不同的海域特征参数 A 和 B 也不同 [22]。

表 1 不同海域的特征参数

Tab. 1 Characteristics of different sea areas

海域	中国南海	墨西哥湾	北海
特征参数 A	0.272	0.1388	0.327
特征参数 B	0.158	0.187	0.146

由此,导管架结构的倒塌失效概率 P_f 可通过积分得到,即

$$P_f = P(RSR < E) = \int_0^{\infty} P_E(E) p_{RSR}(E) dE = \exp\left[\frac{A-R_m}{B} + \frac{V_R^2 R_m^2}{2B^2}\right] \left[1 - \Phi\left(\frac{V_R R_m}{B} - \frac{1}{V_R}\right)\right] \quad (19)$$

式中 $\Phi()$ 为标准正态分布函数。

在导管架平台结构风险评估分析中,需要考虑一根平台构件疲劳失效后的倒塌失效概率,即针对平台结构失去一根杆件后的倒塌失效概率进行计算。定义剩余储备能力比 RCR 为

$$RCR = Q_h / Q_d \quad (20)$$

式中 Q_h 为受损平台极限水平荷载,是构件疲劳受损后对平台结构进行极限强度分析获得的,表示所关注构件发生损坏后导管架的整体承受能力,也就是剩余的抗力。

3 导管架结构的风险评估

选取南海某平台进行定量风险评估实例分析,该平台水深 110.9 m,于 20 世纪 90 年代初建成并进行投产。该导管架平台为双斜式桩腿 8 桩腿结构,上部设施有生活区域模块,可供约 60 人居住,其他主要设施还有直升机甲板模块、储存装置、注水装置、压缩机、起重机及火炬臂等装置。平台设计的生产年限为 10 年,结构设计寿命为 20 年。平台结构在 1997 年,2002 年,2004 年和 2010 年先后增加了设备,通过 SACS 软件建立了相应的有限元

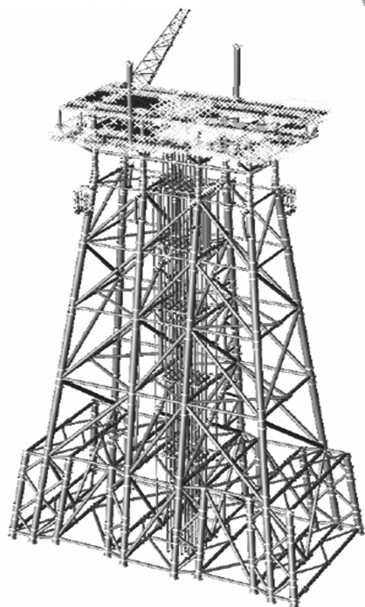


图 1 南海某导管架平台结构有限元模型
Fig. 1 FEM model of a jacket platform in the South China Sea

模型,如图 1 所示。平台的结构损伤和结构缺陷会降低结构的强度或放大荷载作用^[23],本文根据平台结构的检验数据采用折减壁厚的方法进行处理。

3.1 平台结构的疲劳失效概率

通过 SACS 疲劳分析计算,可以得到导管架平台结构各个节点的疲劳寿命。疲劳寿命较小的节点大多位于水面附近的两层钢架结构处,都为水平撑和斜撑结构。选取典型节点 0456(单元号为 0456-0455)进行疲劳失效概率分析,SACS 选取 API-X' 疲劳 S-N 曲线进行校核,得到疲劳寿命为 26.6 年,如图 2 所示。为了保持一致性,在疲劳失效概率分析中,也采取 API-X' 疲劳 S-N 曲线。其他相关计算参数列入表 2。

基于第 2 节的可靠性计算方法,可得到该节点随服役时间变化的疲劳失效概率曲线,其中代表性节点 0456 的疲劳失效概率如图 3 所示。可以看出,该节点的疲劳失效概率随服役时间增长而逐渐

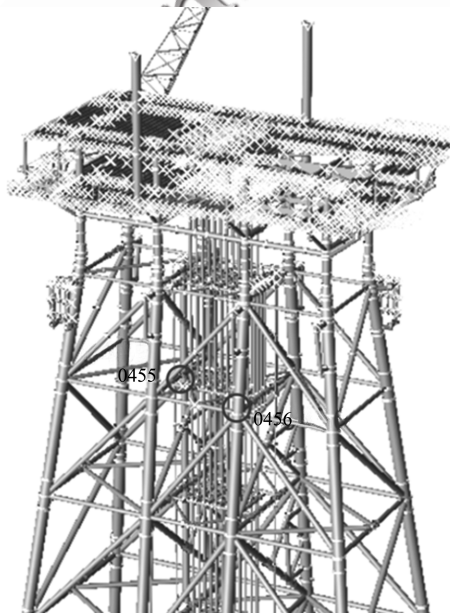


图 2 导管架平台结构中典型节点 0456 位置图
Fig. 2 Location of typical node 0456 in the jacket platform

表 2 疲劳失效概率计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of fatigue failure probability

变量	分布	均值	变异系数/标准差
m	确定性	3.74	—
h	确定性	1.00	—
Δ	对数正态	1.00	0.30 [#]
$\ln n$	正态	15.38	0.30 [*]
$\log_{10}(a)$	正态	13.39	0.28 [*]
q	对数正态	12.18	0.10 [#]

注: # 代表变异系数, * 代表标准差; $\log_{10}(a)$ 的变异系数基于文献[11]; q 值基于方程(4)计算。

增加,但增幅逐年减缓。本文对平台结构典型节点服役 5 年,10 年,15 年和 20 年的疲劳失效概率进行分析,计算结果列入表 3。

3.2 平台结构的倒塌失效概率

通过 SACS 倒塌分析可得到导管架平台结构的极限承载能力。对于定量风险评估分析,需要进行后果分析,即一个平台结构构件发生疲劳失效后,平台剩余的极限承载能力的分析。假定上面发生疲劳失效的杆件完全失效,在模型中删除后进行倒塌失效概率计算,所得计算结果列入表 4。可以看出,该平台结构冗余度很高,即使失去一个平台结构构件,仍然具有很大的抗力,在理想状态下不

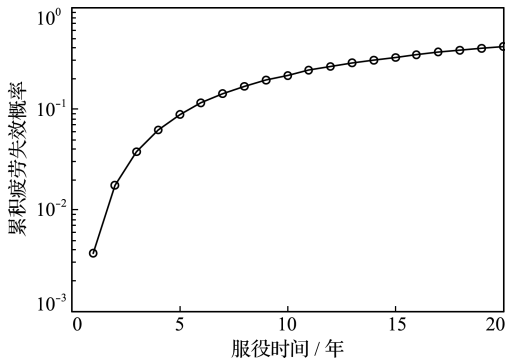


图 3 平台服役期间节点 0456 的疲劳失效概率
Fig. 3 Fatigue failure probability of node 0456 in the platform service period

表 3 导管架平台中典型节点的疲劳失效概率
Tab. 3 Fatigue failure probability of typical node in the jacket platform

节点号	单元号	疲劳寿命 /年	疲劳失效概率			
			5 年	10 年	15 年	20 年
0368	0368-0367	36	0.05	0.15	0.24	0.32
0411	0441-0440	17	0.17	0.35	0.47	0.56
0456	0456-0455	27	0.09	0.22	0.33	0.42
0456	0457-0456	33	0.06	0.17	0.27	0.35
0532	0532-0533	40	0.04	0.13	0.21	0.29
0534	0534-0533	20	0.13	0.29	0.41	0.50
0534	0534-0535	48	0.03	0.09	0.17	0.24

表 4 典型节点不同时间倒塌失效概率
Tab. 4 Collapse failure probability of typical node

节点号	单元号	RCR	倒塌失效概率
0368	0368-0367	2.02	3.5498e-5
0411	0441-0440	2.08	2.5508e-5
0456	0456-0455	1.96	4.9471e-5
0456	0457-0456	2.11	2.1635e-5
0532	0532-0533	2.06	2.8474e-5
0534	0534-0533	1.96	4.9471e-5
0534	0534-0535	2.02	3.5498e-5

会随着服役时长而改变。因此在后续工作中,应该针对影响平台结构抗力的关键构件进行分析。由于处于平台倒塌失效路径上的构件通常对整体结构抗力影响较大,因此应该针对失效路径中的关键构件进行相关风险评估。

3.3 导管架平台结构的失效风险矩阵及检验目标

失效风险可定义为失效可能性和失效后果的集合。在导管架平台结构的定量分析过程中,平台结构构件的失效风险概率可表示为

$$P(RISK) = P_{f-accumulated} \times P_{f-Coll|Fatigue} \quad (21)$$

式中 $P(RISK)$ 为平台结构构件的失效风险概率, $P_{f-accumulated}$ 为导管架平台结构构件的疲劳累积失效概率, $P_{f-Coll|Fatigue}$ 为该平台结构去掉该杆件后的倒塌失效概率。

通过 3.2 节的分析方法可得到导管架平台关键构件的风险失效概率,计算得到的服役期 5 年和 20 年后的风险概率列入表 5。由此还可以进一步构建导管架结构的失效风险矩阵,如图 4 和图 5 所示。可以看出,导管架平台结构的倒塌失效概率不变,但不同服役期内各关键构件的风险随服役时间整体上移。假设 10^{-5} 为风险评估标准,当平台服役期为 5 年时,平台构件的风险水平较低,未达到风险评估范围;当服役期为 20 年时,杆件都已进入风险评估范围,在服役期间需要进行重点关注,参照相关检验目标并制定检验计划。根据 DNV 和相关规范对北海在役平台结构完整性评估的经验做法,检验目标一般可以确定为^[24]:当平台结构某构件疲劳破坏导致平台倒塌失效概率小于 10^{-2} 时,该构件的累积疲劳失效概率的检验目标为 10^{-2} ;当平台结构某构件疲劳破坏导致平台倒塌失效概率大于 10^{-1} 时,该构件的累积疲劳失效概率的检验目标为 10^{-3} 。

表 5 导管架平台结构中关键构件的风险概率
Tab. 5 Risk probability of components in jacket platform

单元号	倒塌失效 概率	服役 5 年		服役 20 年	
		疲劳失效 概率	风险 概率	疲劳失效 概率	风险 概率
0368-0367	3.5e-5	0.05	1.8e-6	0.32	1.1e-5
0441-0440	2.6e-5	0.17	4.4e-6	0.56	1.4e-5
0456-0455	5.0e-5	0.09	4.3e-6	0.42	2.1e-5
0457-0456	2.1e-5	0.06	1.3e-6	0.35	7.6e-6
0532-0533	2.9e-5	0.04	1.2e-6	0.29	8.1e-6
0534-0533	5.0e-5	0.13	6.5e-6	0.50	2.5e-5
0534-0535	3.6e-5	0.03	1.0e-6	0.24	8.3e-6

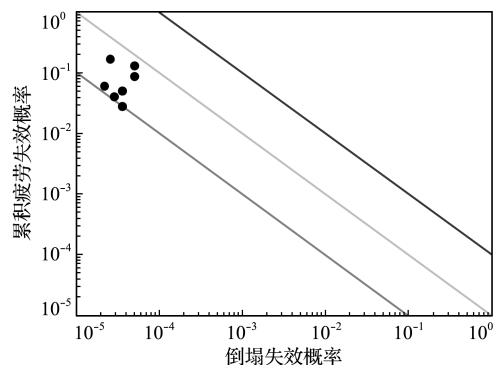


图4 导管架平台结构在服役5年时典型节点的风险矩阵
Fig. 4 Risk matrix of typical nodes of the jacket platform structure after 5 years in service

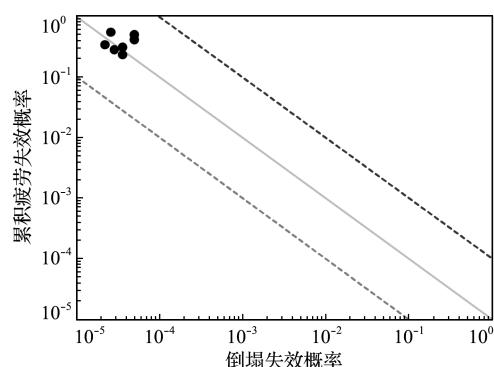


图5 导管架平台结构在服役20年时典型节点的风险矩阵
Fig. 5 Risk matrix of typical nodes of the jacket platform structure after 20 years in service

4 结 论

基于RBI技术,对导管架平台结构进行了风险评估的定量分析,给出了平台结构构件累积疲劳失效概率及平台倒塌失效概率的计算方法,并通过导管架平台结构实例进行了方法验证,形成了风险矩阵并给出了检验目标,可以指导基于风险的检验计划制定,以优化检验间隔,降低检验成本。本文疲劳失效概率计算是基于S-N曲线计算得到,没有考虑平台检验后的概率更新,这在后续工作需进一步完善。

参考文献(References):

[1] 郑苗壮,刘 岩,李明杰,等.我国海洋资源开发利用现状及趋势[J].海洋开发与管理,2013,30(12):13-16. (ZHENG Miao-zhuang, LIU Yan, LI Ming-jie, et al. Current situation and trend of exploitation and utilization of marine resources in China [J]. *Ocean Development and Management*, 2013, 30(12): 13-16. (in Chinese))

[2] 周守为.海洋工程平台结构设计[M].北京:石油工业出版社,2007. (ZHOU Shou-wei. *Platform Structure Design of Offshore Engineering* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007. (in Chinese))

[3] 邢金有,隋智享.老龄平台极限强度评估[J].中国海洋平台,2004,19(2):35-37,29. (XING Jin-you, SUI Zhi-xiang. Assessment of ultimate bending moment of an aged platform [J]. *China Offshore Platform*, 2004, 19(2): 35-37, 29. (in Chinese))

[4] 陈团海,陈国明,张 超,等.基于风险的老龄平台检修规划[J].中国海洋平台,2014,29(3):51-56. (CHEN Tuan-hai, CHEN Guo-ming, ZHANG Chao, et al. Risk-based inspecting planning for ageing platform [J]. *China Offshore Platform*, 2014, 29(3): 51-56. (in Chinese))

[5] Lassen T. Risk based fatigue inspection planning-state of the art[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 66: 489-499.

[6] Landet E, Lotsberg I, Sigurdsson G. Risk-based inspection of an FPSO [A]. *Offshore Technology Conference (OTC)* [C]. Houston, Texas, USA, 2000.

[7] Stadie-Frohbös G, Lampe J. Risk based inspection for aged offshore pipelines [A]. *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013)* [C]. Nantes, France, 2013.

[8] Montes-Iturrizaga R, Heredia-Zavoni E, Marcial-Martínez E, et al. Risk based structural integrity management using bayesian probabilistic nets [A]. *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2006)* [C]. Hamburg, Germany, 2006.

[9] 耿雪峰,左延田,薛小龙.基于风险的检验技术在我国的应用现状研究[J].化工装备技术,2012,33(1):17-22. (GENG Xue-feng, ZUO Yan-tian, XUE Xiao-long. Research on the application of risk based inspection technology in China [J]. *Chemical Equipment Technology*, 2012, 33(1): 17-22. (in Chinese))

[10] Li D Q, Zhang S K, Tang W Y. Risk based inspection and repair optimization of ship structures considering corrosion effects [A]. *Proceedings of 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2004)* [C]. Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.

[11] Bai Y, Ashri M, Badaruddin M F, et al. Risk based inspection (RBI) for subsea equipments [A]. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2010)* [C]. Shanghai, China, 2010.

[12] API-RP-2SIM. *Structural integrity Management of Fixed Offshore Structures* [M]. API, 2014

[13] Faber M H, Engelund S, Sørensen J D, et al. Simplified and generic risk based inspection planning [A]. *Proceedings of the 19th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2000)* [C]. New Orleans, USA, 2000.

[14] Straub D, Faber M H. Risk based acceptance criteria for joints subject to fatigue deterioration [A]. *Proceedings of the 22nd International Conference on*

- Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2003) [C]. Cancun, Mexico, 2003.
- [15] Heredia-Zavoni E, Silva-González F, Montes-Iturriza R. Reliability analysis of marine platforms subject to fatigue damage for risk based inspection planning [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, **130**(4): 41001.
- [16] Lotsberg I, Sigurdsson G. A new recommended practice for inspection planning of fatigue cracks in offshore structures based on probabilistic methods [A]. Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering [C]. San Francisco, USA, 2014.
- [17] 胡毓仁, 李典庆, 陈伯真. 船舶与海洋工程结构疲劳可靠性分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012. (HU Yu-ren, LI Dian-qing, CHEN Bo-zhen. *Probability Analysis of Structure Fatigue for Ship and Offshore Engineering* [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2012. (in Chinese))
- [18] 龚顺风, 何 勇, 金伟良. 海洋平台结构随机动力响应谱疲劳寿命可靠性分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2007, **41**(1): 12-17. (GONG Shun-feng, HE Yong, JIN Wei-liang. Fatigue life reliability analysis of stochastic dynamic response spectrum for offshore platform structures [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, **41**(1): 12-17. (in Chinese))
- [19] 陈团海, 陈国明, 张 超, 等. 老龄平台定量风险评价 [J]. 石油工程建设, 2013, **39**(6): 12-17. (CHEN Tuan-hai, CHEN Guo-ming, ZHANG Chao, et al. Quantitative risk assessment aging platform [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2013, **39**(6): 12-17. (in Chinese))
- [20] DNVGL-RP-C203. *Fatigue design of Offshore Steel Structures* [M]. DNVGL, 2014.
- [21] DNVGL-RP-C210. *Probabilistic Methods for Planning of Inspection for Fatigue Cracks in Offshore Structures* [M]. DNVGL, 2015.
- [22] 中国船级社. 固定式导管架平台结构可靠性分析指南 [M]. 中国船级社. (China Classification Society (CCS). *Guide for Probability Analysis of Fixed Jacket Platform Structure* [M]. China Classification Society (CCS), 2014. (in Chinese))
- [23] 欧进萍, 段忠东, 肖仪清. 海洋平台结构安全评定——理论、方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. (OU Jin-ping, DUAN Zhong-dong, XIAO Yi-qing. *Safety Assessment of Offshore Platform Structure——Theory, Methods and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [24] 卢 华, 周 雷, 王巍巍, 等. RBI 技术在导管架平台结构延寿中的应用 [J]. 中国海洋平台, 2016, **31**(3): 60-65. (LU Hua, ZHOU Lei, WANG Wei-wei, et al. RBI technique used in the life-extension of in-service jacket platform structure [J]. *China Offshore Platform*, 2016, **31**(3): 60-65. (in Chinese))

Risk analysis of jacket platform structure based on failure probability of fatigue damage and collapse

LIU Yuan

(Offshore Engineering Technology Center of China Classification Society, Tianjin 300457, China)

Abstract: The risk-based inspection (RBI) technology has become a popular research topic in offshore industry, and its advantage lies in optimizing the inspection scope and reducing the inspection cost. In this study, the finite element method (FEM) is adopted to analyze the fatigue damage and the collapse failure. The fatigue failure probability of the key components of a platform structure is determined based on the reliability theory. Meanwhile, the collapse failure probability of the platform structure is analyzed when the key components are broken. The risk matrix is calculated with the results above for the platform to draw up the inspection plan. Finally, the quantitative risk assessment of a jacket platform at the South China Sea is performed, the risk matrix of key points and components is generated to inform the inspection target and plan. This study can aid formation of the inspection plan for the jacket platform reasonably and efficiently. The cost can be reduced under the safe operation conditions for platform structures.

Key words: jacket platform structure; risk-based inspection (RBI); risk analysis; collapse failure; fatigue damage

引用本文/Cite this paper:

刘 圆. 基于疲劳损伤和倒塌事故的导管架平台结构风险分析 [J]. 计算力学学报, 2019, **36**(5): 650-655.

LIU Yuan. Risk analysis of jacket platform structure based on failure probability of fatigue damage and collapse [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(5): 650-655.