



海洋平台结构安全评定

—— 理论、方法与应用

欧进萍
段忠东 著
肖仪清



科学出版社

www.sciencep.com

海洋平台结构安全评定

——理论、方法与应用

欧进萍 段忠东 肖仪清 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地阐述了海洋平台结构安全评定的理论、方法和应用。第1、2章是海洋环境随机荷载的概率模型和海洋平台结构冰致振动的分析方法;第3、4章是海洋平台结构累积损伤及抗力衰减分析与检测、维护和修理技术;第5~7章是海洋平台结构安全评定的确定性和可靠性方法以及检测、维修与报废决策方法;第8章是渤海八号生产平台服役安全评定和维修决策过程;第9章是海洋平台结构的实时安全监测方法和系统。

本书可供从事海洋与船舶工程、水利工程、土木工程和工程力学研究、设计与管理的广大科技人员参考,可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海洋平台结构安全评定:理论、方法与应用/欧进萍,段忠东,肖仪清著. —北京:科学出版社,2003.5

ISBN 7-03-011384-5

I. 海… II. ①欧…②段…③肖… III. 海上平台—安全—评价
N. TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 026683 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:曹锐军
责任印制:刘士平 / 封面设计:张 放

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年5月第 一 版 开本:(B5)720×1000
2003年5月第一次印刷 印张:17
印数:1—3 000 字数:314 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

海洋平台结构是海洋油气资源开发的基础性设施,是海上生产作业和生活的基地。自 1947 年墨西哥 Couissana 海域建造第一座钢质海洋石油开采平台以来,随着海洋油气资源开发的大规模发展,世界上已建造近 6000 座海洋石油开采平台。我国自 20 世纪 60 年代起开始在渤海勘探和开发海上石油以来,目前已建成海洋平台 100 余座。随着我国渤海大油田的开发,近五年还将建设 100 余座海洋平台。

海洋平台结构复杂,体积庞大,造价昂贵。特别是与陆地结构相比,它所处的海洋环境十分复杂和恶劣,风、海浪、海流、海冰和潮汐时时作用于结构,同时还受到地震的威胁。在如此环境条件下,环境腐蚀、海生物附着、地基土冲刷和基础动力软化、材料老化、构件缺陷和机械损伤以及疲劳和裂纹扩展的损伤积累等不利因素,都将导致平台结构构件和整体抗力的衰减,影响结构的服役安全度和耐久性。历史上由于对海洋环境的复杂性和随机性以及平台结构的损伤积累和服役安全度认识不充分,国内外曾发生多次海洋平台事故,造成了重大的经济损失和不良的社会影响。因此,有效地检测、监测和预测海洋平台结构的损伤累积过程,把握结构和结构构件抗力衰减的规律,评定和预测结构的安全性和可靠性,以及及时地对结构进行维修加固,以便延长结构使用寿命和增强结构抵抗突发性极端荷载的能力,是保证结构安全运营、最大限度地避免事故发生的有效措施。

本书包括概述、1~9 章和附录,较系统地阐述了海洋平台结构安全评定的理论、方法和应用。概述较全面地综述了本书相关研究与应用的进展和发展趋势;第 1 章是海洋环境随机荷载的概率模型,介绍了风、海浪和海冰等环境要素的极值概率模型和疲劳荷载谱模型以及平台结构安全评定荷载标准的确定方法;第 2 章是海洋平台结构冰力作用模型与冰激振动,介绍了海冰的动力作用模型、随机动冰力模型和海洋平台结构冰致振动的分析方法;第 3 章是海洋平台结构累积损伤与抗力衰减,介绍了金属构件、管节点和退役平台结构材料的疲劳累积损伤与抗力衰减的分析方法;第 4 章是海洋平台结构检测、维护与修理技术,介绍了平台结构检测选点方法、检测随机性的概率模型、平台结构维修技术,以及平台结构检测、维护与修理数据库系统;第 5 章是海洋平台结构安全评定——确定性方法,介绍了现役平台结构的计算模型修正以及结构构件和整体的确定性安全评定方法;第 6 章是海洋平台结构安全评定——可靠度方法,介绍了平台结构构件可靠度分析方法和基于极限分析的体系可靠度近似分析方法;第 7 章是海洋平台结构检测、维修与报废决策,介绍平台结构的多因素模糊综合维修决策方法以及基于安全分析的检测和

维修选点方法;第8章是渤海八号生产平台的安全评定,介绍了渤海八号生产平台结构历年检测和维修结果以及服役安全评定和维修决策过程;第9章是海洋平台结构的实时安全监测,介绍了海洋平台结构实时安全监测方法和监测系统;附录是海洋平台结构检测维修、安全评定与实时监测软件系统。

海洋平台结构是荷载、抗力和风险相对比较复杂、矛盾比较集中和突出的结构形式,因此本书针对海洋平台结构介绍的以上理论、方法和应用对于其他土木工程结构环境荷载随机模型的建立、评定荷载标准的确定、结构构件和整体的安全评定、结构安全监测与系统的研制开发具有很好的借鉴和参考意义。

本书的内容是作者及其领导的课题组10多年来在海洋工程领域有关海洋平台结构安全评定研究的总结。10多年来,相关研究先后得到了中国海洋石油总公司“八五”科技攻关项目——海上结构物检测、维护与修理和“九五”科技重点项目——现役固定式海洋平台结构的体系可靠度分析与安全评定,中海石油天津分公司与国家自然科学基金委员会联合资助的“九五”重大项目课题——现役海洋平台结构的安全与防护研究(即复杂环境下海洋平台结构系统的优化理论)(项目编号:59895410),国家杰出青年科学基金项目——重大工程结构的累积损伤、安全评定与控制(项目编号:59625815),以及国家高技术研究与发展(863)计划项目——海洋平台结构实时监测与检测成像技术(项目编号:2001AA602023)的资助。对上述所有项目的资助,作者表示衷心的感谢!

本书作者及其领导的课题组10多年来在海洋工程领域的研究一直得到王光远院士的鼓励和指导,作者特表由衷的感谢!参加本书内容相关研究的还有陆钦年教授,以及在攻读博士和硕士学位期间参加研究的刘学东、黄虎杰、王刚、周道成、孙劲松、李宏伟、龙旭、王欣平和杨冀东等,作者对他们为本书相关内容研究所作出的贡献表示感谢!对本书内容相关研究给予密切合作并给予很大支持的中海石油有限公司天津分公司(原中海石油渤海公司)的员彩芬、张兴才和牛世广等高级工程师,作者表示诚挚的谢意!本书部分内容还参考了参与中国海洋石油总公司“八五”科技攻关项目——“海上结构物检测、维护与修理”研究的其他大学和研究机构的研究成果,特向这些研究报告的作者表示感谢!

主要符号

a	裂纹缺陷特征尺寸
a_{th}	最小可探测裂纹缺陷尺寸
$[A]$	判断矩阵
$C, [C]$	阻尼系数, 阻尼系数矩阵
$C_I(t)$	强迫动冰力函数
D	损伤因子
$f(\cdot)$	概率密度函数
$f_j^{(r)}$	结构重分析的构件实际最大应力
$F(\cdot)$	概率分布函数
FCP	无损检测误报率
$F_{aj}^{(d)}$	构件设计采用的许用强度
F_d	平台结构设计荷载下的基底剪力或倾覆力矩
F_s	静冰力
F_u	平台结构极限荷载下的基底剪力或倾覆力矩
$F_{uj}^{(d)}$	构件设计采用的极限强度
$F_{uj}^{(r)}$	构件的实际极限强度
F_{uo}	完好平台结构极限荷载下的基底剪力或倾覆力矩
F_{ur}	现役平台结构极限荷载下的基底剪力或倾覆力矩
F_y	材料屈服强度
$g(\cdot)$	结构功能函数
h	冰厚度
$H(\omega)$	频域响函数
$K, [K]$	刚度系数, 刚度系数矩阵
K_{IC}	I 型裂纹尖端临界应力强度因子
$K_j^{(d)}$	构件设计安全系数
$K_j^{(r)}$	现役平台结构构件的实际安全系数
ΔK	应力强度因子范围
m_k	随机变量第 k 阶谱矩
$M, [M]$	质量, 质量系数矩阵

N_f	疲劳寿命
$P(\cdot)$	事件的概率
P_E	杆件欧拉力
P_f	失效概率
POD	无损检测检出率
Q_{RS}	采用极限基底剪力代表的结构体系抗力
Q_{SS}	采用环境荷载基底剪力代表的荷载效应
R	结构或构件抗力
R_v	维修等级综合评定矩阵
R_s	结构储备强度系数
R_r	结构剩余强度系数
R_{sr}	结构剩余储备强度系数
S	结构荷载效应
$S(\omega)$	冰力功率谱
$S_x(\omega), S_{\dot{x}}(\omega), S_{\ddot{x}}(\omega)$	位移、速度和加速度响应功率谱密度
v_0	冰速
$\{w\}$	权重向量
$x(t), \{X(t)\}$	位移、位移向量
$\dot{x}(t), \{\dot{X}(t)\}$	速度、速度向量
$\ddot{x}(t), \{\ddot{X}(t)\}$	加速度、加速度向量
$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$	结构的基本随机向量
η_s	应力比安全度指标
β	可靠度指标
δ	随机变量的变异系数
$\theta_j^{(d)}$	构件设计强度储备
$\theta_j^{(r)}$	现役平台结构构件的实际强度储备
μ	随机变量均值
μ_A	模糊集合 A 的隶属度向量
ξ_i	第 i 阶振型阻尼比
ξ_I	冰阻尼比
ρ_{ik}	荷载 P_i 和 P_k 的相关系数
σ	均方差
$\sigma_u^{(d)}$	设计强度
$\sigma_u^{(r)}$	剩余强度
$\{\varphi\}_i$	第 i 阶振型

φ	构件强度储备比
Φ	结构整体强度储备比安全度指标
ψ	结构极限承载力安全度指标
ω	圆频率
ω_{0i}	第 i 阶自振频率

目 录

前言	
主要符号	xvii
绪论	1
第 1 章 海洋环境荷载的概率模型	12
1.1 中国近海海洋环境观测资料	12
1.1.1 中国近海海洋环境要素的观测	12
1.1.2 中国近海海洋环境要素观测资料	14
1.1.3 海洋环境要素资料的推算	16
1.1.4 海洋环境要素的短期、中期和长期统计与结构设计环境条件	17
1.2 海洋环境要素的极值概率模型和疲劳荷载谱模型	18
1.2.1 单变量极值环境要素的概率分布	19
1.2.2 多变量极值环境要素的联合概率分布	21
1.2.3 海洋环境疲劳荷载谱模型	24
1.3 海洋环境荷载及其概率特征	25
1.3.1 风	25
1.3.2 波浪	27
1.3.3 海流	29
1.3.4 海冰	30
1.4 渤海海洋环境要素概率模型参数统计分析	31
1.4.1 极值环境要素概率分布参数统计	31
1.4.2 环境疲劳荷载谱统计	43
1.5 现役结构安全评定的环境荷载标准	46
1.5.1 问题的提出与表述	46
1.5.2 现役结构确定性安全评定的环境荷载标准	48
1.5.3 现役结构可靠度评定的环境荷载标准	49
第 2 章 海洋平台结构的动冰力作用与冰激振动	51
2.1 动冰力作用的统一模型	51
2.1.1 按冰破碎形式分类的动冰力时程	51
2.1.2 冰力作用的“负阻尼”特性与自激振动冰力	53
2.1.3 动冰力的统一模型与冰力函数	55

2.2	海洋平台结构的随机动冰力模型	56
2.2.1	冰压力测量及样本选取	57
2.2.2	正面迎冰点冰压力谱密度及其参数	57
2.2.3	冰压力随机场模型及其参数确定	60
2.3	海洋平台结构冰致自激振动分析	62
2.3.1	自激动冰力产生的物理条件	62
2.3.2	海洋平台结构冰致自激振动的特征	66
2.4	海洋平台结构冰致强迫振动分析	70
2.4.1	结构屈曲动冰力和弯曲动冰力作用的强迫振动分析	71
2.4.2	结构挤压随机动冰力作用的随机振动分析	73
2.4.3	海洋平台结构强迫振动分析算例	75
2.4.4	JZ20-2MUQ 平台结构冰激强迫振动分析	80
第3章	海洋平台结构的累积损伤与抗力衰减	88
3.1	构件疲劳累积损伤与抗力衰减	88
3.1.1	基于连续介质损伤力学的构件疲劳累积损伤与抗力衰减分析	89
3.1.2	基于断裂力学的构件疲劳累积损伤与抗力衰减分析	91
3.2	焊接管结点的疲劳累积损伤与抗力衰减	92
3.2.1	管结点的 $S-N$ 曲线和裂纹扩展参数	93
3.2.2	影响管结点疲劳性能的几个因素	96
3.2.3	管结点疲劳损伤后的剩余抗力	98
3.3	已退役渤海八号平台结构钢力学性能试验与分析	99
3.3.1	退役平台结构钢材的力学性能试验	101
3.3.2	海洋平台结构环境损伤与构件抗力衰减规律	106
3.3.3	渤海八号平台结构构件环境累积损伤与抗力衰减分析	109
第4章	海洋平台结构的检测、维护与修理技术	112
4.1	海洋平台结构的检测技术	112
4.1.1	检测程序	112
4.1.2	检测方法	112
4.1.3	测点的选择与优化	114
4.2	海洋平台结构检测随机性分析	116
4.2.1	无损检测(NDT)的随机性	117
4.2.2	检测随机性的概率处理方法	118
4.3	海洋平台结构的维修技术	119
4.3.1	海洋平台结构维修的特点	119
4.3.2	维修基本方法及其选择的参考标准	121
4.4	海洋平台结构检测、维护与修理(IMR)数据库系统	124

4.4.1	系统开发环境及开发工具	124
4.4.2	系统的功能	124
4.4.3	系统模块划分	125
第5章	海洋平台结构安全评定——确定性方法	127
5.1	现役结构损伤的模型修正	127
5.1.1	基于损伤分析的模型修正	127
5.1.2	基于检测结果的模型修正	128
5.1.3	维修加固效果考虑	130
5.2	结构构件安全评定	130
5.2.1	构件应力比	130
5.2.2	构件强度储备比	130
5.3	结构整体安全评定的汇总方法	131
5.3.1	层次分析法	131
5.3.2	强度储备比汇总法	133
5.4	结构整体安全评定的极限分析方法	134
5.4.1	海洋平台结构极限分析方法及其软件	134
5.4.2	基于极限承载力分析的结构整体安全评定	138
5.5	结构损伤和缺陷对极限承载力的影响分析	141
5.5.1	凹陷类缺陷的影响	141
5.5.2	裂纹类缺陷的影响	142
5.5.3	腐蚀的影响	143
5.5.4	疲劳累积损伤和材料老化的影响	144
5.5.5	基础冲刷的影响	145
5.5.6	海生物附着的影响	145
第6章	海洋平台结构安全评定——可靠度方法	146
6.1	结构可靠度分析基本方法	146
6.2	海洋平台结构构件可靠度分析	147
6.2.1	构件荷载效应的统计矩	147
6.2.2	构件抗力及其随机性	149
6.2.3	构件可靠度计算	149
6.2.4	海洋平台结构构件可靠度分析	150
6.2.5	渤海 JZ20-2MUQ 平台结构构件可靠度分析	152
6.3	海洋平台结构体系可靠度近似分析	153
6.3.1	抽样统计方法	153
6.3.2	荷载等效方法	154
6.3.3	全概率方法	154

6.3.4	荷载效应方法	156
6.3.5	渤海 JZ20-2MUQ 平台结构体系可靠度分析	156
6.4	现役海洋平台结构可靠度分析	162
6.4.1	现役结构可靠度分析的特点	162
6.4.2	JZ20-2MUQ 平台服役现状	163
6.4.3	现役 JZ20-2MUQ 平台构件可靠度分析	164
6.4.4	现役 JZ20-2MUQ 平台体系可靠度分析	165
第 7 章	海洋平台结构检测、维修与报废决策	167
7.1	基于疲劳可靠度分析的海洋平台结构检测选点方法	167
7.1.1	节点疲劳分析	168
7.1.2	选择检测点	169
7.1.3	与周期性检测的比较	169
7.1.4	节点分组	170
7.1.5	目标可靠度	170
7.2	海洋平台结构维修决策方法	170
7.2.1	决策集的确定	171
7.2.2	因素集的确定	171
7.2.3	单因素综合评定	171
7.2.4	多因素综合评定	176
7.3	海洋平台结构大修与报废准则	178
7.3.1	结构大修准则	178
7.3.2	结构报废准则	180
7.4	基于构件失效序列的海洋平台结构维修选点方法	180
7.4.1	确定结构构件失效序列	181
7.4.2	确定维修点	181
7.4.3	评定维修效果	181
第 8 章	渤海八号生产平台的安全评定	182
8.1	平台结构评估用环境荷载的确定	185
8.1.1	渤海海域环境荷载的概率分布	185
8.1.2	评估用环境荷载的确定	186
8.2	平台结构的历年服役状况及其计算处理	186
8.2.1	平台结构历年检测结果汇总	186
8.2.2	平台结构历年维修记录	190
8.2.3	平台历年服役状况等效计算处理	192
8.3	平台结构内力重分析与构件安全评定	193
8.3.1	渤海八号生产平台结构的内力重分析	193

8.3.2	渤海八号平台结构的强度校核准则	196
8.3.3	基本构件安全指标及评定结果	196
8.4	平台结构整体安全评定	199
8.4.1	基本构件分类	199
8.4.2	结构分层	200
8.4.3	综合安全指标	200
8.5	平台结构的近似极限承载力分析	204
8.5.1	计算结果分析	204
8.5.2	结果评价	208
8.6	渤海八号平台结构维修决策	209
8.6.1	决策分析	209
8.6.2	维修决策结果评价	211
8.6.3	平台结构近似可靠度评价	211
第9章	海洋平台结构的实时安全监测	213
9.1	海洋平台结构实时安全监测方法	213
9.1.1	实时结构计算模型的建立与修正	213
9.1.2	结构环境荷载的实时监测与确定	214
9.1.3	结构安全状况的实时评定	216
9.2	渤海 JZ20-2MUQ 平台结构实时安全监测系统	217
9.2.1	实时监测传感系统	217
9.2.2	实时安全监测系统	218
9.2.3	实时安全监测结果	220
9.3	海洋平台结构远程实时安全监测	222
9.3.1	总体框图	223
9.3.2	系统分析	223
9.3.3	系统实现	225
9.3.4	关键技术	226
附录	海洋平台结构检测维修、安全评定与实时监测软件系统	228
A.1	IMRSEM 系统组成	228
A.2	IMR 数据管理系统	228
A.2.1	系统数据组织	229
A.2.2	系统功能设计	230
A.3	海洋平台结构安全评定系统	231
A.3.1	数据管理	232
A.3.2	结构安全评定	234
A.4	IMR 辅助工具	240

A. 4. 1 制定检测方案 241

A. 4. 2 制定维修方案 241

A. 4. 3 评定维修方案效果 241

A. 5 海洋平台结构实时安全监测系统 242

参考文献..... 243

CONTENTS

Preface

Main Symbols xvii

Introduction 1

Chapter 1 Probability Models of Offshore Environmental

Loads 12

1.1 Observation Data of Offshore Environmental Conditions in China 12

1.1.1 Observation of Offshore Environmental Conditions 12

1.1.2 Observation Data of Offshore Environmental Conditions 14

1.1.3 Simulation of Offshore Environmental Data 16

1.1.4 Statistical Analysis of Short, Middle and Long Term Offshore Environmental Factors with Relationship to Structural Design Environmental Conditions 17

1.2 Extreme Probability Models and Fatigue Spectrum Models for Offshore Environmental Loads 18

1.2.1 Probability Distributions of Single Variable for Offshore Environmental Factors 19

1.2.2 Joint Probability Distributions of Multiple Variables for Offshore Environmental Factors 21

1.2.3 Fatigue Spectrum Models for offshore Environmental Loads 24

1.3 Offshore Environmental Loads and Their Probabilistic Characteristics 25

1.3.1 Wind 25

1.3.2 Wave 27

1.3.3 Current 29

1.3.4 Ice 30

1.4 Statistical Analysis of Probability Models for Bohai Offshore Environmental Factors 31

1.4.1 Statistical Analysis of Extreme Probability Distributions 31

1.4.2 Statistical Analysis of Fatigue Load Spectrum Models 43

1.5	Environmental Load Criterion for Safety Evaluation of In-service Structures	46
1.5.1	Statement of the Problem	46
1.5.2	Environmental Load Levels for Deterministic Safety Evaluation	48
1.5.3	Environmental Load Levels for Reliability Evaluation	49
Chapter 2 Dynamic Ice Loads and Ice Induced Vibration of Offshore Platform Structures		51
2.1	Uniform Dynamic Ice Load Models	51
2.1.1	Dynamic Ice Force History Classification by Ice Failure Pattern	51
2.1.2	Negative Damping of Dynamic Ice Force and Self-excited Ice Force	53
2.1.3	Uniform Dynamic Ice Load Models and Ice Force Functions	55
2.2	Stochastic Dynamic Ice Force Models for Offshore Platform Structures	56
2.2.1	Ice Pressure Measurements and Samples	57
2.2.2	Spectrum Density Functions of Ice Pressure at Frontal Point	57
2.2.3	Stochastic Spatial Models for Columns	60
2.3	Ice-induced Self-excited Vibration Analysis for Offshore Platform Structures	62
2.3.1	Physical Conditions for Self-excited Ice Force	62
2.3.2	Characteristics of Ice-induced Self-excited Vibration	66
2.4	Ice-induced Forced Vibration Analysis for Offshore Platform Structures	70
2.4.1	Forced Vibration Analysis under Buckling and Bending Dynamic Ice Force	71
2.4.2	Random Vibration Analysis under Stochastic Crushing Ice Force	73
2.4.3	Examples of Forced Vibration Analysis for Offshore Platform Structures	75
2.4.4	Ice-induced Forced Vibration Analysis of JZ20-2MUQ Platform	80
Chapter 3 Damage Accumulation and Resistance Degradation of Offshore Platform Structures		88
3.1	Fatigue Damage Accumulation and Resistance Degradation of Structural Members	88
3.1.1	Fatigue Damage Accumulation and Resistance Degradation Analysis Based on Continuum Damage Mechanics	89

3.1.2	Fatigue Damage Accumulation and Resistance Degradation Analysis Based on Fracture Mechanics	91
3.2	Fatigue Damage Accumulation and Resistance Degradation of Welded Tubular Joints	92
3.2.1	S-N Curve and Crack Propagation of Tubular Joints	93
3.2.2	Factors That Influence the Fatigue Property of Tubular Joints	96
3.2.3	Residual Resistance of Fatigue Damaged Tubular Joints	98
3.3	Experiments and Analysis of a Retired Structural Steel	99
3.3.1	Experiments of Mechanical Properties of Retired Steel	101
3.3.2	Environment-induced Damage and Resistance Degradation of Structural Members	106
3.3.3	Environment-induced Damage and Resistance Degradation Analysis of Bohai No. 8 Platform Structures	109

Chapter 4 Inspection, Maintenance and Repair Techniques for

	Offshore Platform Structures	112
4.1	Inspection Techniques	112
4.1.1	Inspection Procedure	112
4.1.2	Inspection Approaches	112
4.1.3	Inspection Member and Join Planning	114
4.2	Analysis of Inspection Randomness	116
4.2.1	Randomness of NDT	117
4.2.2	Probability Models of Inspection Randomness	118
4.3	Repair Techniques	119
4.3.1	Features of Repair	119
4.3.2	Basic Repair Techniques	121
4.4	IMR Database System	124
4.4.1	Development Environment and Tools for the System	124
4.4.2	Functions of System	124
4.4.3	Modules of System	125

Chapter 5 Safety Evaluation for Offshore Platform Structures:

	Deterministic Approaches	127
5.1	Model Updating of Damaged Structures	127
5.1.1	Model Updating Based on Damage Analysis	127
5.1.2	Model Updating Based on Inspection Results	128
5.1.3	Model Updating Based on Repairing Effectiveness	130