

“十一五”国家高技术研究发
展计划（863计划）资助项目

现役海洋平台结构 检测与安全评估技术

Structural Inspection and Safety Assessment
Technology for In-service Offshore Platform

李志刚 李华军 陈祥余 段梦兰 著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

现役海洋平台结构检测与 安全评估技术

李志刚 李华军 陈祥余 段梦兰 著

中国海洋大学出版社

• 青岛 •

图书在版编目(CIP)数据

现役海洋平台结构检测与安全评估技术 / 李志刚等
著. —青岛: 中国海洋大学出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-5670-0309-5

I. ①现… II. ①李… III. ①海上平台—结构—检测
②海上平台—结构—安全评价 IV. ① U656. 603

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 113099 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	http://www.ouc-press.com	
电子信箱	hpjiao@hotmail.com	
订购电话	0532-82032573 (传真)	
责任编辑	矫恒鹏	电 话 0532-85902349
印 制	青岛双星华信印刷有限公司	
版 次	2013 年 8 月第 1 版	
印 次	2013 年 8 月第 1 次印刷	
成品尺寸	185 mm × 260 mm	
印 张	15.25	
字 数	360 千字	
定 价	86.00 元	



序

2010年,我国海洋油气产量已超过5 000万吨油当量,建立了“海上大庆油田”,这标志着我国已进入海洋油气生产大国的行列。根据国务院颁布的《全国海洋经济发展“十二五”战略》,2015年我国海洋油气产量将达到6 000万吨油当量。目前,在全力加快推进海洋深水油气田的勘探开发的同时,现役海上油气设施完整性管理的重要性日益凸显。2010年墨西哥湾漏油事件造成的巨大影响,警示行业必须高度重视海上油气设施及装备在安全性、可靠性方面的要求。国家科技部十分重视,并将该领域关键技术的研究列入国家863计划的研究项目,对有关技术研究工作加大了科技投入,其中之一是作为海上固定平台结构完整性管理的核心关键技术——平台结构检测和安全评估。

本书作者是这一项目的研究承担团队,主要从事海洋工程设计、海洋工程检测、检测设备研制及海洋工程结构安全评估技术研究等工作,具备多年的海上施工和研究经验,结合项目的研究成果从第一线的角度阐释了技术的细节,使本书具有了更接近实际工程的指导意义。

本书内容主要是基于“十一五”国家863计划海洋技术领域重点项目“基于振动检测的现役海洋平台结构安全评估技术研究”的研究成果。通过对海洋平台无线振动检测技术、水下定量检测技术、桩基冲刷检测技术、平台损伤识别模型修正技术、桩基弱化的平台承载力评估及基于综合信息的平台结构安全评估技术的论述,并结合海上平台结构完整性管理的需要、流程与意义,比较全面系统地论述了海上固定平台结构检测和安全评估相关技术和主要设备。本书最后一章还给出了锦州20-2MUQ平台的工程示范实例,阐述了本书涉及的相关技术、设备的工程示范应用,从而验证了本书成果的工程应用的可行性。

本书的出版是对我国在海上固定平台结构检测和安全评估技术的提升和进步,将对我国海上油气设施完整性管理相关技术起到积极的推动作用。本书可以为海洋工程技术人员和相关专业的在校研究生提供参考,同时也能对油气设施完整性管理其他相关技术研究起到一定的借鉴作用。

中国工程院院士:

曾恒一

为了确保海洋平台的安全运营,近年来海洋平台结构完整性管理(structural integrity management, SIM)逐渐成为我国海洋石油工业的一个热点。海洋平台结构完整性管理是确保海洋平台结构在从安装就位到弃置的整个寿命周期内保持“适用性”(fitness for purpose)的一个持续过程。完整性管理是一个完善的、系统的管理过程,是用整体优化的方式管理平台结构的整个寿命周期,以达到平台结构的可靠性、安全性、经济性以及环保的要求并可持续发展。SIM 为平台的结构适用性评估、检测、维护和修理等提供一个合理的框架程序,其中,检测和适应性评估是 SIM 的核心。本书针对固定式海洋平台结构检测与安全评估中的关键技术、分析方法、主要设备等进行了较为全面系统的阐述。

本书作者主要从事海洋工程设计、海洋工程检测及检测设备研制与海洋工程结构安全评估方法研究等工作,具备多年的海上施工和研究经验,承担多个国家 863 计划课题、重大专项项目和省部级科研课题。本书是在作者多年的研究成果基础上结合工程实践撰写而成的。

本书共 8 章。第 1 章介绍了海洋平台结构完整性管理的特征、要素与意义及海洋平台结构检测与安全评估方法的研究进展,由李志刚、肖仪清、周雷、赵强执笔;第 2 章介绍海洋平台无线振动检测技术,包括无线振动检测仪的系统设计与应用等,由李志刚、何川、喻言、张传杰、宋海涛执笔;第 3 章介绍了海洋平台水下定量检测技术,包括检测工艺、检测测点选择标准等,由陈祥余、潘东民、陈勇、张大伟执笔;第 4 章介绍了海洋平台桩基冲刷形位测量技术,包括桩基冲刷形位测量仪器的研制、应用及相关配套技术等,由李志刚、李海森、周天、邓平执笔;第 5 章介绍了基于桩基弱化的平台承载力评估,包括平台桩基弱化规律及承载力评估等,由段梦兰、钟超、袁志林、李记忠执笔;第 6 章介绍了基于振动检测的平台模型修正损伤诊断技术,包括平台模态参数识别、模型修正及损伤识别技术等,由李华军、王树青、刘福顺、孟元栋、高志强执笔;第 7 章介绍了基于综合信息的平台结构安全评估技术,包括评估荷载标准、结构构件损伤模型更新、结构安全等级标准及评估计算方法等,由李志刚、李华军、周道成、赵雪峰、王巍巍执笔;第 8 章以渤海辽东湾海域锦州 20-2MUQ 平台为工程示范实例介绍了以上技术的应用情况,由李志刚、王喆、汤海江、徐龙达、颜昌德执笔。

“十一五”期间,本书作者在海洋平台结构检测与安全评估方面的研究得到了国家高技术研究发展计划(863 计划)项目——基于振动检测的现役海洋平台结构安全评估技术研究(项目编号:2008AA092701)的支持。本书的出版得到了上述项目的资助,在此表示衷心的感谢!特别感谢国家科技部 863 计划海洋技术领域办的沈建忠处长、孙清处长及向长生博士对本项目的大力支持与指导!感谢国家 863 计划海洋技术领域专家组对本项目研究的指导与帮助!

本项目自立项以来,一直得到欧进萍院士的指导与帮助。欧院士曾多次参与本项目的工作会和技术协调会,为本项目实施的技术路线和关键技术攻关进行把关和指导,为本项目的顺利实施和成功验收提供了有力的支撑。本书在起草阶段也得到了欧院士的指导。在此,作者对欧院士表示衷心的感谢和崇高的敬意!

参与本书统稿、校稿的人员除作者外,还有李慧、张敏、魏玉阔、刘凯、栾涛、钟德理、李英超、王超、谭玉阳、张洪亮、谭玲、焦日刚、刘晟晔、胡知辉、马殿斌、李光奎、李伟、王国栋、高攀、王建国、姜绍云、孙成功,对他们为本书的出版所作出的贡献表示感谢!

限于我国的研究基础和本书所涉及技术内容的复杂性,也限于作者的水平,书中不足之处在所难免,恳请读者和专家给予批评指正。

作 者

2013 年 6 月

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 现役海洋平台结构完整性管理基本特征	2
1.2.1 结构完整性管理的特点	2
1.2.2 结构完整性管理的四个要素	2
1.2.3 结构完整性管理的意义	4
1.3 现役海洋平台结构安全评估方法	4
1.3.1 现役海洋平台结构安全评估特点	4
1.3.2 海洋平台结构的累积损伤与抗力衰减	5
1.3.3 海洋平台结构检测与维护技术进展	5
1.3.4 海洋平台结构损伤识别与模型修正技术进展	6
1.3.5 海洋平台结构确定性安全评估方法研究进展	7
1.3.6 海洋平台结构可靠度评估方法研究进展	8
1.4 导管架海洋平台结构设计概述	10
1.4.1 导管架平台的结构组成	10
1.4.2 导管架平台结构设计范围及设计原则	10
1.4.3 导管架平台结构设计应遵循的规范、标准	11
1.4.4 常用设计分析软件	12
1.5 参考文献	12
第 2 章 海洋平台结构振动检测	16
2.1 概述	16
2.2 海洋平台结构安全检测与监测技术进展	16
2.2.1 结构无损振动检测	16
2.2.2 无线传感器网络	17
2.2.3 振动传感技术	19
2.2.4 信号同步采集	19

2.3	基于无线传感器网络技术的海洋平台多点空间振型同步采集技术	21
2.3.1	系统原理	21
2.3.2	系统构成	25
2.3.3	系统关键功能	25
2.4	振动测试中的传感器优化配置	29
2.4.1	传感器优化配置准则	29
2.4.2	基于模态参数识别的传感器配置方法	30
2.4.3	基于损伤诊断的传感器配置方法	31
2.5	参考文献	33

第3章 海洋平台水下定量检测 35

3.1	水下定量检测技术	35
3.1.1	水下定量检测目的及原则	35
3.1.2	检测计划和内容	36
3.1.3	检测方法及要求	37
3.1.4	检测数据处理	41
3.2	水下定量检测操作工艺	41
3.2.1	水下目视检测	41
3.2.2	水下超声波测厚	41
3.2.3	水下磁粉检测	42
3.2.4	水下电位测量	42
3.2.5	结构裂纹检测	42
3.2.6	进水杆件检测	42
3.3	平台结构无损检测测点选择标准	43
3.3.1	平台结构水下检测测点选择现状与经验	43
3.3.2	各类规范对水下检测测点选择的要求	46
3.3.3	平台结构水下检测测点选择理论及标准	48
3.4	参考文献	51

第4章 基于多波束测深技术的海洋平台桩基冲刷检测 53

4.1	概述	53
4.2	多波束测深技术基础	53
4.2.1	镜像区域和非镜像区域回波特点	54
4.2.2	幅度检测法	55
4.2.3	分裂子阵相位检测法	55
4.2.4	多子阵相位检测法	56
4.3	海洋平台海底地基形位测量仪	59
4.3.1	海洋平台海底地基形位测量仪系统组成	59

4.3.2	安装载体运动补偿技术	60
4.3.3	测量数据融合及三维地形成图技术	66
4.4	海洋平台海底地基形位仪测量流程	78
4.4.1	设备安装	78
4.4.2	待测区域初步测量	80
4.4.3	安装误差校准	81
4.4.4	测区确定与测线规划	82
4.4.5	正式测量	83
4.4.6	数据后处理	83
4.5	参考文献	84
第 5 章	基于桩基冲刷与弱化的平台承载力分析	86
5.1	概述	86
5.1.1	桩-土相互作用分析及桩基弱化研究进展	87
5.1.2	API 规范推荐的桩基设计方法	88
5.2	平台在动荷载及冲刷条件下的弱化规律	90
5.2.1	动荷载作用下平台桩基基础弱化	90
5.2.2	冲刷作用下平台桩基基础弱化	93
5.3	桩基弱化后承载力分析方法	99
5.3.1	平台桩基弱化试验研究	100
5.3.2	平台桩基弱化数值分析	113
5.3.3	基于试验和数值模拟的桩基承载力评估	118
5.4	参考文献	120
第 6 章	海洋平台模型修正与损伤诊断	123
6.1	概述	123
6.2	海洋平台结构模态参数识别技术	123
6.2.1	复指数法	123
6.2.2	多参考点复指数法	125
6.2.3	特征系统实现算法(ERA)	127
6.3	海洋平台结构有限元模型修正技术	129
6.3.1	实测不完备模态处理技术	129
6.3.2	交叉模型交叉模态方法	130
6.3.3	基于模型修正的阻尼矩阵识别方法	133
6.4	海洋平台结构损伤诊断技术	136
6.4.1	模态应变能法	137
6.4.2	模态应变能分解法	138
6.4.3	基于 CMCM 的损伤识别方法	145

6.4.4	损伤识别流程	147
6.5	参考文献	148
第7章	现役海洋平台结构安全评估	152
7.1	概述	152
7.2	现役海洋平台结构安全评估荷载标准	152
7.2.1	海洋环境要素极值概率模型	153
7.2.2	海洋平台结构荷载概率模型及其统计分析	154
7.2.3	海洋环境要素极值更新概率模型	161
7.2.4	现役平台结构安全评估环境荷载标准	164
7.3	平台损伤构件安全评估方法	166
7.3.1	现役海洋平台结构损伤性能影响与模型修正	166
7.3.2	疲劳构件极限承载能力寿命预测方法	169
7.3.3	平台结构构件安全等级评估方法	172
7.4	平台结构整体安全评估方法	176
7.4.1	平台结构整体破坏标准及其安全度指标	176
7.4.2	基于极限承载能力的平台确定性评估方法	179
7.4.3	基于极限承载能力的平台可靠性评估方法	179
7.5	平台结构维修决策	181
7.5.1	平台结构维修常用方法	181
7.5.2	平台结构维修模糊决策方法	182
7.6	参考文献	192
第8章	工程示范实例	195
8.1	概述	195
8.1.1	目标平台介绍	195
8.1.2	平台结构设计荷载	196
8.1.3	工程示范实施方案	199
8.2	平台结构振动检测	200
8.2.1	测点布置方案	200
8.2.2	振动检测数据处理与分析	202
8.3	基于振动检测的平台模型修正与损伤诊断	204
8.3.1	模态参数识别	204
8.3.2	模型修正	205
8.3.3	损伤识别	208
8.4	水下定量检测	208
8.4.1	导管架杆件Ⅰ类检测	208
8.4.2	导管架杆件Ⅱ类检测	208

8.4.3	导管架杆件Ⅲ类检测	209
8.4.4	平台检测结果	210
8.5	平台桩基冲刷形位检测	210
8.5.1	测区确定与测线规划	210
8.5.2	检测数据处理	211
8.6	桩基弱化后平台承载力分析	215
8.6.1	环境和工程地质条件	215
8.6.2	桩身位移计算	215
8.6.3	桩基局部冲刷	215
8.6.4	桩基局部冲刷与桩基弱化后 p - y 曲线计算	216
8.7	锦州 20-2MUQ 平台结构安全评估	218
8.7.1	现役平台结构安全评估荷载	218
8.7.2	平台结构 SACS 模型	219
8.7.3	平台结构安全评估	220
8.7.4	平台结构维修决策	222
8.8	数据管理	223
8.8.1	平台安全数据库概述	223
8.8.2	锦州 20-2MUQ 平台示范工程数据管理	224
附录 专业词汇英汉对照表		230

第1章 绪论

1.1 引言

我国海域辽阔,大陆海岸线长达 18 000 多千米,海岛 7 000 多个,大陆架面积约有 110 万平方千米,管辖海域近 300 万平方千米。渤海、黄海、东海和南海都有大面积的沉积盆地,石油资源储量约 400 亿吨、天然气约 15 万亿立方米。浩瀚的大海是人类社会可持续开发利用的资源宝库。

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,世界上已建造有近 6 000 座海洋石油开采平台。目前建造使用的海洋平台结构形式主要有:固定式(包括钢质导管架式、顺应塔式和钢筋混凝土重力式)、半潜式(包括钻井船等浮动采油系统)和张力腿式。各种类型的海洋平台结构及其适应水深如图 1-1-1 所示。

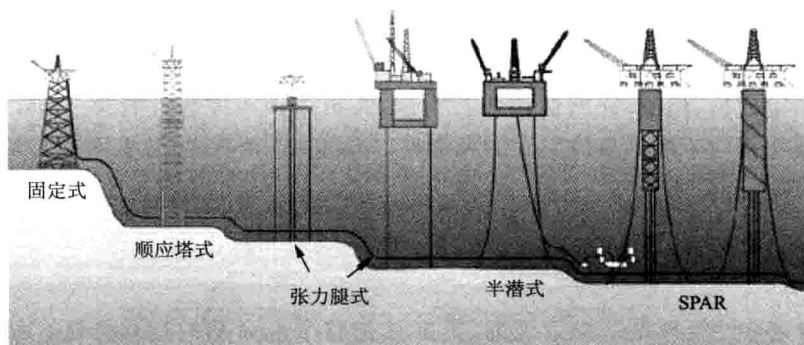


图 1-1-1 海洋平台结构的基本形式

我国海洋平台结构的主要形式是固定式导管架结构,此外,还有自升式钻井船、单点系泊和人工岛等。我国自 20 世纪 60 年代起开始在渤海勘探和开发海上石油,目前已建成固定式海洋平台 200 余座,固定式平台的最大水深已达到约 190 m。

海洋平台结构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,同时还受到地震作用的威胁。在此环境条件下,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,国内外都曾有多次海洋平台的事故,造成了重大的经济损失和不良的社会影响。例如,在 Hilda(1964)和 Betsy(1965)飓风中,墨西哥湾总数约 1 000 座的平台中,有 22 座或者倒塌,或者损坏至不能使用。1969 年春,我国自行建造的渤海海域的老二号平台被海冰推倒。1980 年 3 月,北海 Ekofisk 油田的 Alexander L. Kielland 号钻井平台由于一支腿因为疲劳裂纹引起断裂,

致使整座平台倾覆,导致 122 人死亡。在 1992 年的 Andrew 飓风中,墨西哥湾总数为 3 850 座平台中又有 19 座平台损坏至不能使用,这些平台大部分是 1965 年前设计建造的。2005 年 Katrina 飓风造成墨西哥湾至少 30 座平台遭受不同程度的破坏。海洋油气资源开发事故的惨痛教训令世人震惊! 这些惨痛的教训给海洋资源开发以很大的警示,同时也促使各国政府和海洋石油部门加倍地投资和促进科研与工程技术人员致力于海洋平台安全与防护的科学技术研究。

1.2 现役海洋平台结构完整性管理基本特征

为保证平台的安全运营,需要识别平台结构主要风险,对主要风险进行监督,采取具体的措施降低风险,使维修决策和其他决策活动更为合理,保障油田设施有序、高效、安全地运转。因此实施平台结构的完整性管理意义十分重大。

平台结构完整性管理是指对平台结构全寿命期内对各种潜在的危害因素进行识别、分析、控制及排除,确保结构安全、可靠和适用性的管理。通过监测/检测设备获得的信息/数据进行分析、处理、评价,识别危害结构安全的各种不利或失效因素,并进行评估,制定合理的、必要的检测,维护,维修计划和实施方案,采取修复或缓解威胁的措施。其目的是保证平台结构物理和功能上的完整,使平台结构处于受控状态,通过及时采取措施防止失效事故的发生,减少人员伤亡、经济损失及资源和环境的破坏。

平台结构完整性管理是一个与时俱进的连续执行过程,平台损伤或破坏方式是一种时间依赖的模式。腐蚀、老化、疲劳、自然灾害、机械损伤等能够引起结构失效,因此必须持续不断地进行风险分析、检测、完整性评估及维修、人员培训等完整性管理工作,概括地说,结构完整性管理就是为了降低事故发生的可能性以及事故发生后的后果而进行的不断评估和降低结构风险的过程。

1.2.1 结构完整性管理的特点

(1) 结构完整性管理是一个系统的、贯穿结构整个寿命期的过程方法。结构完整性管理始于平台结构的合理设计、选材和施工,内容涉及平台结构设计、施工、运营、监测、维修、加固、质量控制和通信系统等全过程,并通过信息反馈,不断完善结构的完整性。

(2) 结构完整性管理引入了风险概念,反映了当前结构安全管理从单一安全目标发展到优化、增效、提高综合经济效益的多目标趋向。

(3) 结构完整性管理是一种系统管理体系方法,它不是单纯的、具体的技术标准,而是建立在技术规范及相关研究成果基础之上的一种综合的管理规范体系。

(4) 在设计、建造和运行新平台结构时,融入结构完整性管理的理念和做法,结合平台结构的特点,进行动态的完整性管理,采用计算机信息技术实现可视化与数字化的完整性管理,并对与完整性管理有关的信息进行整合,采用各种新技术,完善完整性管理内容,并建立结构完整性管理机构,制定管理流程,并辅以必要的手段。

1.2.2 结构完整性管理的四个要素

海洋平台结构完整性管理框架主要由四个要素组成:数据、评价、检测计划及检测实施。

1. 数据

实时更新的平台数据信息是进行结构完整性管理的先决条件,最新的数据是保证结构完整性管理的基础,可分为特征数据和状态数据。特征数据主要包括平台初始状态时的信息,完工图纸和文件资料、建造数据以及海上安装数据等;状态数据主要包括反映平台在其寿命周期内特征数据变化的信息,如平台历次改造数据、服役平台检测数据、损伤评估数据、防腐数据、平台结构评估数据、加固/改造/维修数据、状态监测数据以及操作事故数据等。这些数据应能全面、真实地反映平台的实际结构状况。对平台数据的管理不但要收集数据还需要对积累数据进行更新。

2. 评价

评价是通过最新得到的平台数据来评估平台结构安全状态以表明平台结构的适用性的过程。数据评价并不一定意味着需进行详细的结构分析,它包括基于专业知识、操作经验或参照相似平台结构研究数据与详细分析的工程判断。一般来说,出现以下情况应对平台结构进行计算评估:① 人命安全等级提高或失效后果等级提高;② 荷载累计增加超过 10%;③ 结构损伤超过 10%;④ 损伤和荷载变化造成承载能力下降超过 10%。

进行结构评估时,需要考虑多种因素的影响,主要有以下方面:

- (1) 平台位置,平台服役年限,状态,初始设计标准;
- (2) 初始设计及后续评估的分析结果;
- (3) 平台储备强度及结构冗余度;
- (4) 疲劳敏感度;
- (5) 建造及返修或重新焊接的记录;
- (6) 运输或安装过程中出现的任何损伤;
- (7) 建造、运输及安装过程中的检验结果;
- (8) 平台改造、维修及加固记录;
- (9) 突发事件(如火灾、爆炸、船体撞击、落场碰撞等)或极端海况及其他结构超载现象;
- (10) 防腐系统状态;
- (11) 历史检测数据;
- (12) 其他相似平台获得的结构状态的经验。

3. 检测计划

检测计划应根据评估结论制定,是平台检测的总体性和策略性的安排,包括检测的频率、范围及检测的方法、设备等,一般几年为一个周期,并在平台的生命周期内根据平台状况的变化作出适当的调整。在平台的服役寿命期内检测计划要根据得到的数据以及相关 SIM

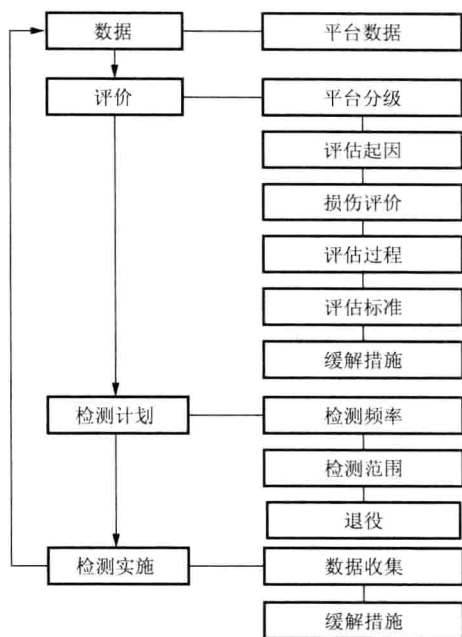


图 1-2-1 海洋平台结构完整性管理流程

数据(例如检测数据、平台评估数据等)的评估进行定期更新。检测计划内容基于以下方面。

(1) 基于失效后果的检测计划:与 API RP 2A(WSD)第 14 章的要求基本一致,这种方法仅仅基于失效后果,忽略了不同平台结构形式对损伤的抵抗能力的差异。

(2) 基于风险的检测计划:借助于结构评估,找出导致平台整体坍塌的关键构件,对其进行重点的检测和关注。

4. 检测实施

根据检测计划的要求,完成相应的现场检测工作,并完成对基线检测及数据收集、水上常规检测、水下常规检测、特殊部位的检测以及对平台结构的加固、改造和维修等缓解及降低风险的措施。保证检测数据的一致性、精确性以及完整性都是至关重要的,最终将所有数据都纳入到 SIM 的数据管理框架中,实现结构完整性管理的一个循环。通过定期的评估循环,可实现对海上固定设施全生命周期的结构完整性管理。

平台结构完整性管理通过数据、评价、检测计划及检测实施四要素为循环的管理模式,实现平台的结构损伤评价、适用性评估、检测计划、维护和修理等要求,为平台的安全运营和科学管理提供了全生命周期的技术保证。

总而言之,SIM 是平台作业者的一个非常重要的工具。SIM 已经应用在墨西哥湾和北海。近年来,我国海洋石油工业界也越来越重视海洋平台的结构完整性管理,中海石油(中国)有限公司已设立了相关的专职机构负责海上油气设施的完整性管理。

1.2.3 结构完整性管理的意义

传统的平台结构安全管理多为被动的事后响应,不但会因事故造成巨大的财产损失和人员伤亡,而且要担负极其昂贵的抢险维修费用。平台结构完整性管理变被动为主动,变事后应急响应为事前检测预防,使平台结构始终处于可控状态,可以有计划、有针对性地采取维护措施,防止损伤或破坏事故的发生,从而最大限度地节约成本,保证平台作业运行安全可靠。而且结构完整性管理是周期循环和持续改进的过程,使结构处于良好的运行状态,对延长平台结构寿命的作用不言而喻。

1.3 现役海洋平台结构安全评估方法

1.3.1 现役海洋平台结构安全评估特点

海洋平台结构安全评估不同于结构设计的安全计算,主要有如下三个方面的特点。

(1) 待评估的结构通常是有损伤的现役结构。如何揭示现役结构真实的损伤状况,然后合理地考虑结构损伤和修正结构模型,以便为结构安全评估的内力重分析提供基础是其关键问题之一。结构的无损检测、累积损伤与抗力衰减分析从某种意义上说都是为这一目的服务的。

(2) 结构的安全评估更着眼于结构的整体安全状况。这是因为结构在服役过程中,由于累积损伤和各种不利要素的影响,结构部分构件很可能不满足安全要求,而由于大型结构的高冗余度,结构整体往往还有足够的承载能力。

(3) 结构安全评估的荷载标准与安全度标准问题。结构设计或安全评估,首先要确定

荷载标准,然后才能分析和计算结构构件或结构整体的安全度指标。此外,结构的安全评估需要有一个标准来衡量结构在当前状态继续使用是否安全,包括结构构件和结构整体的安全度标准。目前结构评估的安全度标准基本上是沿用结构设计的安全度标准。但是,结构设计主要构件的安全指标来控制结构的安全性,还没有实际可用的结构整体安全度标准。因此,努力建立结构的整体安全度标准,不仅是结构评估、同时也是结构设计所期望的。

1.3.2 海洋平台结构的累积损伤与抗力衰减

海洋平台结构在海洋腐蚀的恶劣环境下,受到风、浪、流、冰等动力荷载的作用,材料腐蚀和老化、构件疲劳损伤和裂纹扩展以及海生物附着、地基土冲刷、基础动力软化以及构件缺陷和机械损伤等累积损伤都将导致平台结构构件和整体抗力的衰减,从而影响结构的服役安全性、适用性、耐久性和完整性。

结构或构件在经历了长期的累积损伤过程后,可能以两种方式失效:一种方式是,损伤使结构达到不适合使用的临界状态,甚至使结构在常规荷载作用下失效;另一种方式是累积损伤导致结构抗力衰减,此时虽然损伤未达到临界值,但当结构遇到像地震、台风等强烈的偶然性极端荷载作用时,部分构件甚至结构整体可能失效。海洋平台结构等重要工程设施都有因累积损伤导致抗力衰减,从而引发重大安全事故发生的事件。因此,有效地检测、监测或预测结构的损伤累积过程,掌握构件抗力随损伤累积而衰减的规律,从而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积极有效的措施。

在连续介质损伤力学和断裂力学的理论框架内,段忠东和欧进萍(1997,1998)分析了疲劳损伤导致的海洋平台结构构件抗力衰减规律;考虑疲劳荷载和损伤演变过程内在的随机性,得到了海洋平台结构构件抗力衰减的数字特征。

1.3.3 海洋平台结构检测与维护技术进展

为了探测结构的内部损伤和裂纹扩展,以及适应海上检测作业环境特别是水下检测的特殊环境,国外发展了多种检测技术,包括:磁粉探伤技术、超声波测裂纹和测厚技术、X射线照相技术和交流电场等(Watt,1989;张印桐,1996)。

由于海上结构物的检测费用非常高,合理制定检测计划和科学选择测点对于真实把握结构运行状态、尽可能减少检测费用具有重要的实际意义。图 1-3-1 是 DNV(1986)根据北海油田的检测经验对有无检测计划作出的检测费用的趋势统计。从图中可以看出:有计划的检测,其费用曲线是平缓和容易控制的,尽管起初投入的费用可能会稍高些,而盲目无计划的随意性检测在某种程度或某一阶段也许会节省些人力或费用,但随着结构服役年限的增长,不可控因素的增加将导致结构的安全性和检测费用难以控制。

目前,美国石油协会(American Petroleum Institute, API)、挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)等机构的相关规程中均对海洋平台结构的检测作了详细而严格的规定。这些规定主要包括:检测目的、检测等级、检测项次、检测频率、特检、测点选择、检测记录、人员资格等,此外,对于不同探测技术的操作程序也作了明确严格的规定。有计划、有规律、经常性地对平台结构进行检测、维护、修理和评估,正在逐步地规范化和程序化地纳入海洋平台结构的安全管理规程。

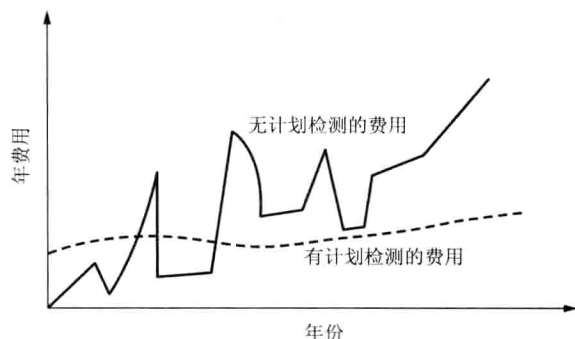


图 1-3-1 有、无计划检测的年费用比较

海洋石油工程股份有限公司从 20 世纪 80 年代以来,采用国际通用的标准和做法,在海洋结构物检测、维护和修理等方面积累了宝贵的资料。在“十一五”国家 863 计划项目的资助下,研究制定了一套适合于我国海洋平台结构的水下检测规范与标准体系,包括检测手册、检测指南、检测程序与方法,形成了一套比较完整的水下检测体系文件。在海洋平台地基基础测试分析技术的研究中,获取海洋平台底部和周围水域的精确三维地形图是一个有效的手段。当平台水域能见度差、水下环境复杂的情况下,水下摄像机和潜水员摸探方式已不再适用,而多波束超声波测深系统能够有效探测水下地形,得到高精度的三维地形图。

1.3.4 海洋平台结构损伤识别与模型修正技术进展

20 世纪 70 年代结构损伤诊断技术首先在海洋工程领域展开研究,当时海洋石油工业开展了大量研究工作。由于受当时技术条件的限制,如仪器设备在恶劣环境作用下的可靠性,数据的远程传输、存储,损伤诊断、振动测试技术等无法满足要求,没有取得较大进展。但基于振动测试的损伤检测技术得到了航空、机械领域研究人员的关注并取得了长足进展。近年来,随着传感器技术、数据传输技术、计算机硬件软件技术、信号分析技术、信号的远程传输、振动测试技术的迅速发展,给大型海洋工程结构健康监测技术带来了新的发展空间。结构的健康监测技术是通过测试结构的动力响应(包括加速度、速度或位移信号),从这些信号中提取出结构的动力特性参数(如模态参数、频响函数等)然后识别结构损伤位置,评估结构损伤程度。

基于振动测试的损伤诊断方法假定当结构的重量和边界条件不变的情况下,结构的损伤会改变结构的动力特性参数(如模态参数、频响函数等),事实上结构的动力特性是结构的固有特性,只有在结构发生变化损伤的情况下,其动力特性才会改变。图 1-3-2 描述了基于动力特性参数变化的损伤诊断的原理图,首先在结构上安装合适的传感器,结构物在激励力(人工激励或环境激励)作用下的振动,结构物本身会振动,安装在结构物上的传感器可以测试得到结构的动力响应(如位移、速度、加速度)信号,通过信号处理,利用模态参数识别技术提取结构模态参数、利用结构损伤诊断算法对结构进行损伤诊断;如果损伤诊断不是基于结构模态参数而是基于结构频响函数,那么可直接通过数据处理计算出的结构频响函数来进行结构的损伤诊断,最终根据一定的诊断标准评价结构物的健康状况。