

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.II-0097-12

海底管线全寿命安全运行的关键问题研究

*周 晶, 冯 新, 李 昕

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁, 大连 116023)

摘 要: 随着我国海洋油气资源开发的快速发展, 海底管线的建设数量不断增多。由于荷载与环境因素的长期作用, 海底管线因为材料老化和损伤累积而导致结构状态退化和承载能力降低的情况十分普遍。为了保证海底管线的安全运行, 急需建立我国的海底管线全寿命安全管理体系。该文首先分析了海底管线全寿命安全运行的关键问题, 然后概括介绍了大连理工大学在海底管线损伤机理与健康监测方面取得的研究进展, 并对今后的研究方向进行了总结与展望。

关键词: 海底管线; 全寿命安全; 损伤机理; 结构健康监测; 安全评价

中图分类号: TE973 **文献标志码:** A

RESEARCH ON CRITICAL ISSUES OF LIFE-CYCLE SERVICE SAFETY FOR SUBSEA PIPELINES

*ZHOU Jing , FENG Xin , LI Xin

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: With the rapid developments of offshore oil and gas explorations, the construction of subsea pipelines is becoming more and more in China. Due to the long-term effects of loading and enviromental factors, the material aging and damage accumulation may lead to the deterioration of strcural status and load-bearing capacity for subsea pipelines. To keep the safe serive, the safety management of subsea pipelines should be established during the life-cycle operation. Fistly, the critical issues on life-cycle service for subsea pipelines were analyzed in the paper. Then the research activities in Dalain University of Technology were briefly reviewd for the damage mechanism as well as structural health monitoring of subsea pipelines. Finally, the issues for future research were put forward.

Key words: subsea pipeline; life-cycle service safety; damage mechanism; structural health monitoring; safety assessment

1 海底管线工程的现状和发展

伴随成为世界第二大经济体, 我国已经成为世界第一能源消耗大国。能源问题日益成为制约我国经济社会发展的瓶颈问题, 从 1993 年起我国已经成为石油纯进口国, 对外石油依存度超过了 55%。而以美国为首的西方国家不惜通过战争手段, 控制中东、北非等产油地区的石油资源, 并且支持某些

国家在海洋石油资源丰富的我国南海地区不断挑起争端, 实施对我国的能源遏制。在这一严峻背景下, 加速石油资源的开发和利用已经成为我国现代化建设的一项基本战略。但是我国却面临着陆地油气资源日益枯竭、部分油田产能大幅下降的不利局面, 今后我国原油产量中的增量部分将主要来自海洋石油。在政府的高度重视与支持下, 近年来我国海洋油气产业发展迅速, 2010 年海洋石油天然气产

收稿日期: 2011-06-23

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体(51121005)、国家自然科学基金面上项目(50978044, 51078060)

作者简介: *周晶(1949—), 男, 上海人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震、生命线工程防灾以及结构健康监测研究(E-mail: zhouj@dlut.edu.cn);

冯新(1970—), 男, 商丘人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事结构损伤机理与健康监测研究(E-mail: fengxin@dlut.edu.cn);

李昕(1971—), 男, 长春人, 教授, 博士, 博导, 主要从事重大工程结构的损伤破坏机理研究(E-mail: lixin@dlut.edu.cn).

量首次超过 5000 万 t, 新增石油产量的 80%来自海洋, 实现了建设“海上大庆”的理想。

海底管线是海上油气资源开发中必不可少的重要组成部分, 担负海上油气集输的重要任务, 是海洋油气工程的生命线。当今, 海底管线技术总的发展趋势是超远距离传输(最长已达 1200km)、超深水深(2000m~3000m)和超大直径(1100mm 或更大), 与之相伴的是海底管线的工作温度和内压不断突破记录(温度可达 150℃, 内压可达 40MPa)。从世界范围来看, 海底管线具有投资巨大、技术难度高、运行风险大的显著特点, 是海洋油气资源开发中最具挑战性的技术环节之一^[1-2]。经过最近二十年的快速发展, 我国海底管线的总里程已经超过 3000km, 而且随着我国油气资源开发向深海进军, 海底管线的建设数量将迅速增加。但是我国海底管线设计规范主要借鉴美国 API 和挪威 DNV 的规范, 深水管线建设几乎完全依赖国外, 在海底管线设计理论、施工技术和安全运行等方面与发达国家相比仍有一定差距。然而, 即便是发达国家, 海洋油气开发工程依然脆弱, 安全保障的理论和技术仍然严重滞后于工程发展速度。于 2010 年发生的墨西哥湾深海石油泄漏事件, 耗资数百亿美元、耗时一个多月才将事故控制住, 而且对周边区域的生态环境造成了巨大破坏, 再一次向海洋油气资源开发活动敲响了安全警钟。而我国在这方面的问题更为突出, 因为我国早期建设的海底管线大多已经进入了服役的中后期, 管线泄漏甚至断裂的事故时有发生。仅 2011 年 6 月份、7 月份, 我国渤海地区就先后发生两起海上油田溢油事故, 除了造成巨额的直接经济损失以外, 已造成周边 3400km² 海域水质由一类下降至三类、四类, 在生态上的长期影响难以评估。因此, 开展海底管线全寿命安全运行关键科学和技术问题的研究, 对提高海上油气资源开发的自主创新能力、突破发达国家的技术垄断并占据领域制高点、确保我国能源和环境的战略安全具有重大意义。

2 海底管线全寿命安全运行中的关键问题

尽管海底管线的结构型式简单, 仅为线形的单层或双层钢管, 但是由于位于恶劣的海底环境, 它所承受的荷载与环境条件却极为复杂。海底管线一方面受到较高的内压和温度等工作荷载的作用, 另

一方面还会长期遭受承受波浪、海流等环境动力因素的作用。更为重要的是, 在长期服役过程中海底管线动力响应所导致的疲劳效应, 以及海洋与内流环境所产生的腐蚀作用, 都将造成管线的损伤累积和材料老化, 使得结构状态不断劣化、承载能力持续下降。然而, 现有分析理论所依据的力学模型和本构关系, 通常都是在理想条件下获得的, 即使对管线结构进行疲劳分析与寿命预测, 也极少考虑与时间和环境相关的材料性能的退化, 难以真实反映海底管线全寿命运行中的结构状态和损伤演化。迄今为止, 国内外在海底管线全寿命安全运行的基础理论和应用技术上的研究都比较薄弱, 难以满足海洋石油开发快速发展的需要。为了保障海底管线安全运行、防止灾害事故发生, 急需建立我国的海底管线全寿命安全管理体系。

我们认为, 海底管线全寿命安全是指海底管线在设计基准期内考虑材料老化和损伤累积效应情况下, 抵御长期和极端荷载作用的结构服役安全性、可靠性和耐久性。因此海底管线的全寿命安全运行必然涉及两个核心问题: 一个是准确描述损伤演化和失效模式的结构分析理论; 另外一个则是结构当前性态的实时反映。以往, 结构分析理论通常以实验室条件下的测试数据和实验现象为依据, 难以真实再现复杂环境中大尺度结构的多因素作用机制和长期环境效应, 所获得的分析结果与现场结构的荷载-响应关系以及损伤演化之间存在一定出入。例如, 依据现有涡激振动分析模型(VIV)获得的海洋立管疲劳寿命的预测值与结构真实寿命通常相差几个数量级。而随着结构健康监测技术的发展, 为突破上述“瓶颈”提供了良好机遇。结构健康监测技术不但可以较为准确地提供现场结构的荷载、环境和响应数据, 而且可以实现结构局部和整体性态改变以及损伤演化的探测, 使现场结构在全寿命服役过程中成为一个实时的实验系统, 为结构分析理论的校准与改进、结构分析模型的修正与确认提供了第一手的现场数据, 搭建了真实结构与理论模型之间的桥梁^[3-4]。毫无疑问, 先进的结构分析理论与现代的健康监测技术已经成为保证海底管线全寿命安全运行的两个重要支柱, 而且相辅相成、互为补充、不可分割。

对于海底管线损伤破坏机理的深入认识, 是建立科学的海底管线结构分析理论的基础。海底管线在长期服役过程中, 与周边环境实际形成了一个海

床-管线-流体(外流和内流)相互作用的复杂体系。它不但受到高温、高内压等工作荷载的严重挑战,而且还遭受内波和海流产生的拖曳力和升力,以及海床滑动、地质塌陷、地震波动效应、断层错动引起的轴向力和弯矩、重物作用引起的冲击荷载等。归根到底,这些效应的共同作用最终都将以内压-轴力-弯矩联合作用的方式施加于结构。当前,对于单一荷载作用下管线损伤破坏机理的研究较多,但是迄今为止,海底管线在内压-轴力-弯矩联合作用下的破坏机理尚未完整揭示,特别是一些理论分析成果仍未得到实验验证。因此,开展复杂荷载作用下海底管线损伤破坏机理与失效模式的研究,对于海底管线的合理设计和科学评估具有重要意义,是海底管线全寿命安全运行研究的基础与关键。

海底管线在服役过程中无法避免损伤累积、环境腐蚀等情况的发生,因此考虑荷载与环境长期作用下海底管线损伤演化机制,是海底管线全寿命安全运行研究无法回避的问题。事实上,海底管线的结构损伤与其材料退化是共生共存的。结构材料中微观缺陷的存在是无法避免的,并在外部环境荷载效应的联合作用之下逐渐演化,同时对材料或结构的宏观力学性能产生显著影响。即使是在宏观裂纹或腐蚀缺陷出现后,材料的损伤尤其是裂纹附近的损伤仍在不断演化,并且推动宏观损伤或缺陷的进一步发展,导致结构状态退化和承载能力降低。考虑海底管线长期服役过程中的损伤演化与抗力衰减,建立海底管线的非线性力学分析模型和高效数值方法,是海底管线全寿命安全运行研究的关键问题之一。

在海底管线监测技术方面,当前国内外主要依赖基于现代监控与数据采集(Supervisory Control and Data Acquisition, SCDA)技术的在线泄漏监测系统,通过对流量、压力等物理量的实时监测判断管线断裂泄漏的发生。但是,基于SCDA的泄漏监测技术以管线发生断裂泄漏为前提,无法实时监测海底管线的环境荷载、动力响应以及损伤演化。特别需要指出,海底管线一旦发生断裂泄漏,则已经酿成安全事故,丧失了系统安全预警与灾害预防的意义。近年来,现代结构健康监测技术在海底管线中逐渐受到重视,国内外先后利用光纤传感、导波监测等技术,研究了针对海底管线动力响应和损伤演化实施监测的可行性。然而,严酷的海底环境以及结构的远距离延伸特征,对监测传感器的长期耐

久性、服役可靠性等提出严重挑战,目前国内外尚无成熟技术可供参考。因此,发展海底管线整体和局部性态监测的先进传感技术,是实施海底管线全寿命安全管理的技术基础,也是海底管线健康监测研究中迫切需要解决的关键问题。

结构健康监测提供了结构在实际服役条件下的真实响应数据,但是由于材料本构关系和结构损伤演化的非线性与随机性,真实的结构状态通常隐藏于监测数据之后,挖掘监测数据所蕴藏的结构损伤信息并提取数据的损伤敏感特征,是进一步实现海底管线损伤识别与安全评估的基础。与此同时,基于海底管线的长期监测数据,发展海底管线实时损伤识别与模型修正的理论和方法,揭示长期监测数据与海底管线损伤机理、失效准则的依赖关系,提出基于长期监测数据的海底管线安全指标体系,建立海底管线全寿命安全评估与多级预警的理论和方法,为海底管线全寿命安全运行提供理论基础。

针对上述海底管线全寿命安全运行的关键问题,大连理工大学“重大工程安全”研究团队在国家自然科学基金、大连理工大学以及海岸和近海工程国家重点实验室相关项目的资助下开展了较为系统的研究,下面将对所取得部分研究成果进行概况总结与介绍。

3 损伤破坏机理研究

3.1 海底管线的地震响应分析模型^[5-8]

我国处于世界两大地震带(环太平洋带和中亚-地中海带)之间,是一个多地震国家,尤其是有着丰富石油资源的渤海湾地区属于地震高发区,铺设海底管线必须考虑地震的影响,地震与工作荷载组合成为管线强度设计控制条件。然而,当前国内外都缺乏海底管线的抗震设计规范或标准,这与我国在强地震地区快速发展海底管线的局面是很不协调的。目前我国海底管线设计所依据的技术规程和规范中只是原则性的提到在地震设防区要考虑地震对管线的作用和影响,却没有具体提出说明地震荷载的考虑方法和计算方法。我们首先开展海底管线的水下振动台动力模型试验,提出了地震作用下海底悬跨管线的动水作用力模型,进而建立了能够考虑内压、温度和地震等复杂荷载同时作用的悬跨海底管线非线性分析模型。

利用国内唯一的水下地震模拟系统,基于弹

性-重力相似准则,确定了悬跨海底管线的相似常数并制作了缩尺模型,研究了不同激励波形、不同激励方向及不同水深等工况下的管线动力响应。根据研究发现,激励方向对管线与周边水体的相互作用有较大影响,当激励方向为水平时水面总体平静,而当激励方向为竖直时水体表面波动十分剧烈(如图1)。而且,在激励峰值相同的条件下,激励方向对陆地管线影响较小,对水下管线影响较大。水下管线在承受水平激励时的反应普遍大于承受竖向激励时的反应,在正弦波和随机波激励两种条件下均有类似现象发生(如图2和图3)。

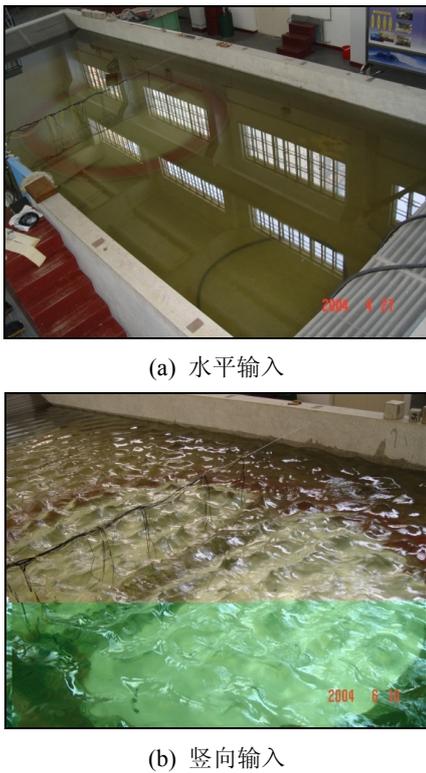
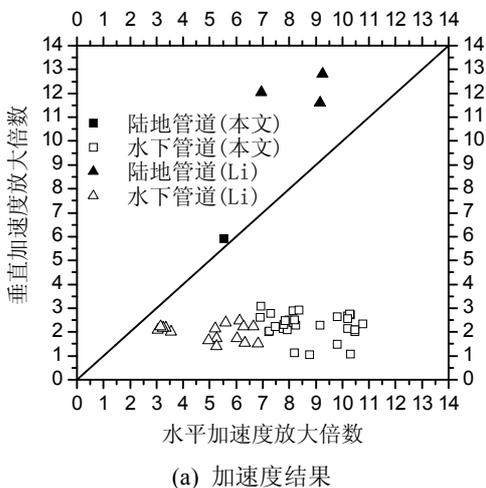
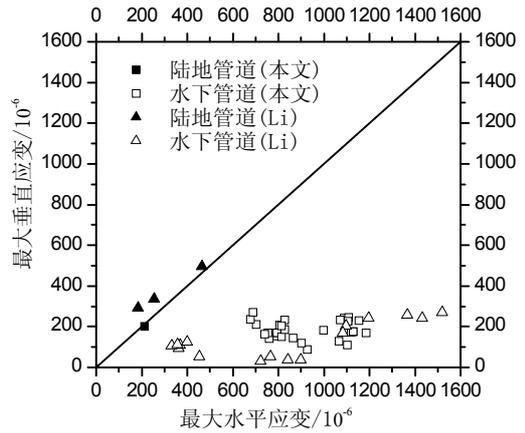


图1 正弦波激励时的水面现象

Fig.1 Water surface under sinusoid excitations

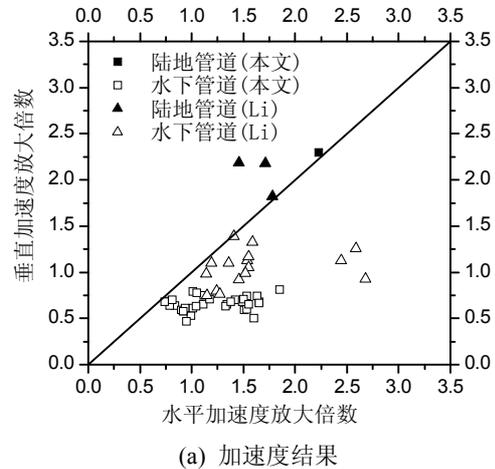


(a) 加速度结果

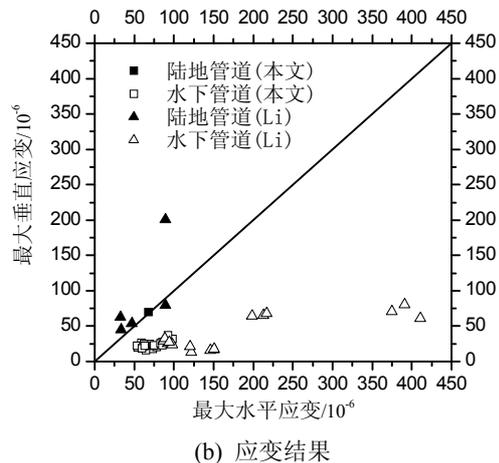


(b) 应变结果

图2 正弦波激励时不同激励方向管线反应峰值
Fig.2 Peak values of dynamic responses for pipeline under sinusoid excitations



(a) 加速度结果



(b) 应变结果

图3 El-Centro 波激励时不同激励方向管线反应峰值
Fig.3 Peak values of dynamic responses for pipeline under El-centro excitations

根据以上实验结果,分别将地震动输入方向的影响引入 Morison 模型和 Wake 模型,对传统的动水作用力模型进行改进,获得了单位长度管线上的附加水质量、附加水阻尼、水体运动位移以及地面

运动引起的单位长度管线上的惯性力系数,分别建立了考虑采用地震时 Morison 模型和 Wake 模型考虑动水作用力的海底管线多点输入运动方程。并将不同动水作用力模型计算结果与试验结果进行了

比较(如图 4 和图 5),从时程结果可以看出,在时程曲线上与试验值吻合最好的是地震时 Wake 模型,其次是地震时 Morison 模型,而利用传统 Morison 模型计算的结果时程与试验值出入较大。

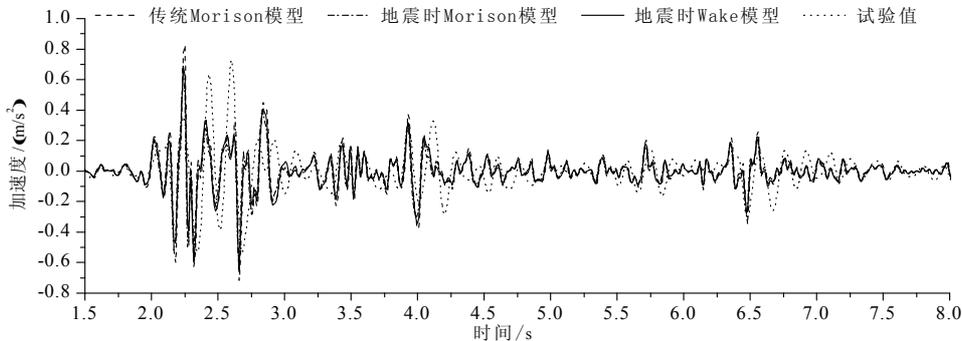


图 4 El Centro 波竖向激励时管线跨中加速度反应的计算值与试验值比较

Fig.4 Computational and experimental accelerations of middle span under El-centro vertical excitations

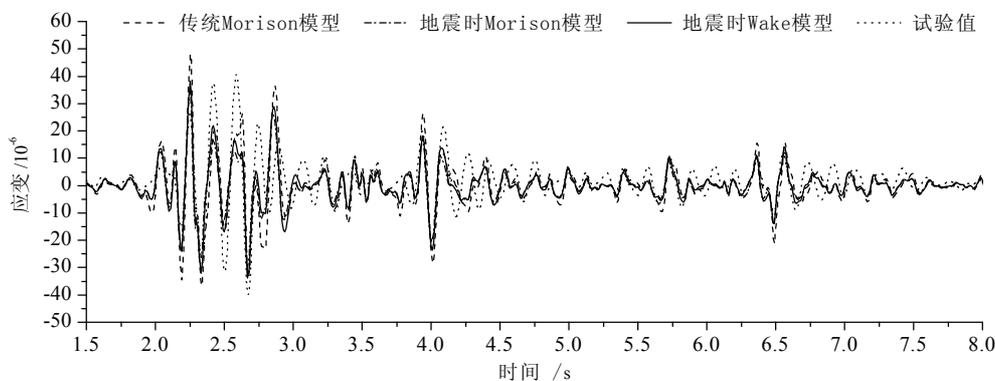


图 5 El Centro 波竖向激励时管线跨中应变反应的计算值与试验值比较

Fig.5 Computational and experimental strains of middle span under El-centro vertical excitations

3.2 海底管线在腐蚀作用下的损伤破坏机理^[9-11]

海底管线所处的海洋环境恶劣,发生腐蚀损伤不可避免。腐蚀是引起海底管线破坏的主要因素之一。实际情况下管线的腐蚀损伤可能由两个或者多个位置的腐蚀形成的腐蚀群,相邻位置腐蚀损伤是相互作用和相互影响的。目前对多点腐蚀损伤海底管线极限荷载和失效模式的研究还不是很多。对多点腐蚀管线的评估采用最保守的方法,这样往往会造成管线不必要的更换,带来较大的经济损失。因此,有必要加强多点腐蚀损伤管线的研究,为复杂腐蚀形式的海底管线的评估提供依据。

采用非线性有限元方法,分析了轴向单点和双点腐蚀管线在内压荷载作用下的破坏机理(如图 6),获得了腐蚀区有效应力与内压的相互关系,建议了轴向长腐蚀管道的极限失效压力计算公式。其中,双点轴向长腐蚀管线的分析结果如图 7~图 9 所示。

基于完全塑性失效机理和 Hill 屈曲准则,考虑了管道轴向和环向材料强度的各向异性,提出了腐

蚀缺陷管道在内压-轴力-弯矩荷载联合作用下的极限承载力的广义解。研究了腐蚀形状(等深度腐蚀、椭圆腐蚀、抛物线腐蚀),腐蚀深度和腐蚀宽度参数的影响对管道极限失效弯矩荷载的影响。研究发现,随着腐蚀深度或腐蚀宽度的加大,也就是随着腐蚀的程度加深,管道的承载力会显现降低,通过对比还可以发现腐蚀形状对管道的极限承载力也有较大的影响,在相同腐蚀深度和宽度下,抛物线腐蚀管道的弯矩荷载承载能力最大,等深度腐蚀管道的弯矩承载能力最小,而椭圆腐蚀介于两者之间。分析结果表明:除了腐蚀深度和腐蚀宽度以外,腐蚀形状也是影响管道极限承载力的重要因素。现有研究中,一般都没有考虑腐蚀形状的影响,规范中只保守地给出了等深度腐蚀管道极限承载力计算公式,没有考虑是实际不规则腐蚀形状。若采用目前的规范将实际腐蚀都简化为等深腐蚀,将会过低估计管道的剩余强度,导致不准确的评估和不必要的修理或更换。

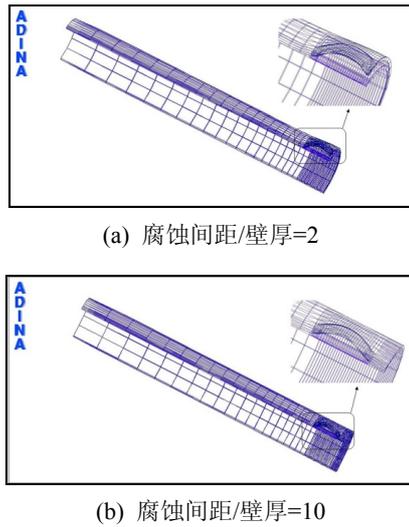


图 6 腐蚀管道在内压荷载作用下的破坏模式
Fig.6 Failure modes for corroded pipeline under internal pressure

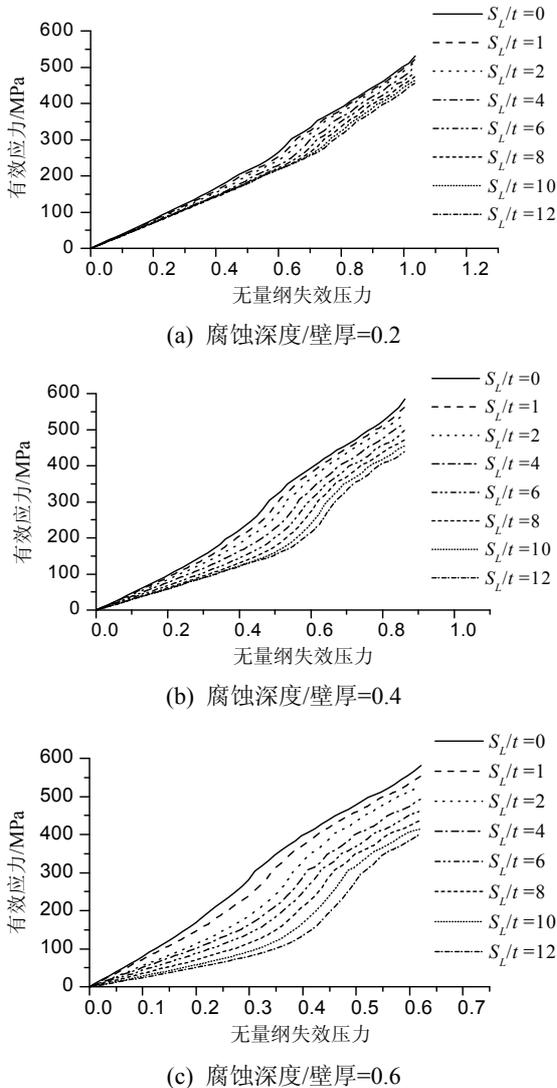


图 7 有效应力随腐蚀间距的变化图
Fig.7 Changes in effective stress with corroded distance

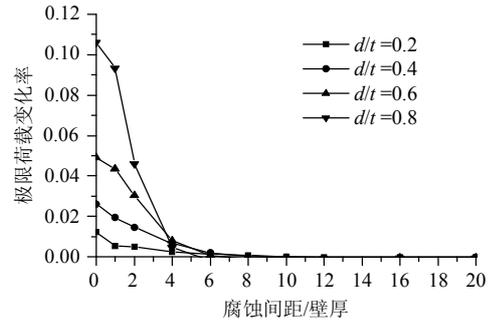


图 8 管道极限荷载变化率随腐蚀间距变化
Fig.8 Changes of ultimate loading with corroded distance

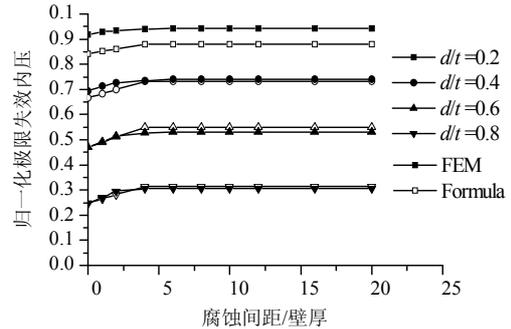


图 9 管道极限失效内压变化
Fig.9 Changes of ultimate internal pressure

3.3 含裂纹海底管线的动力分析模型^[12-14]

在长期荷载以及环境侵蚀的作用下，海底管线在全寿命服役过程中出现裂纹的风险极大。裂纹的出现使其承载能力降低，而且裂纹有进一步发展的可能，导致管线断裂、油气泄漏。但是，现有管线的动力分析和安全评估，裂纹建模主要依靠三维有限元模型，尽管分析精度较高，但是却会造成模型复杂、计算效率低下的缺点，无法满足损伤结构快速重分析与实时损伤识别的要求。为了快速评估含裂纹海底管线的服役安全性，或者实时识别管线损伤及修正管线分析模型，需要一个合理、高效的裂纹管线分析模型。

依据线弹性断裂力学基本原理，采用弹性应变能释放理论，利用应力强度因子与裂纹引入的局部柔度之间的关系，以解析的方法分别获得三种典型裂纹管线(非贯穿直裂纹管、非贯穿圆周裂纹管、贯穿裂纹管)，在轴力、弯矩和剪力联合作用下的含裂纹管线的局部柔度系数。非贯穿直裂纹管的分析模型和局部柔度系数如图 10 所示。计算结果表明：
1) 随着裂纹深度的增加，局部柔度逐渐增大；2) 不同界面规格管在相同荷载条件下的附加局部柔度不同，壁厚/直径比越大，相同荷载导致的局部柔度系数变化预加剧烈；3) 壁厚/直径比越小，在相同裂纹深度条件下其局部柔度系数反而越大。

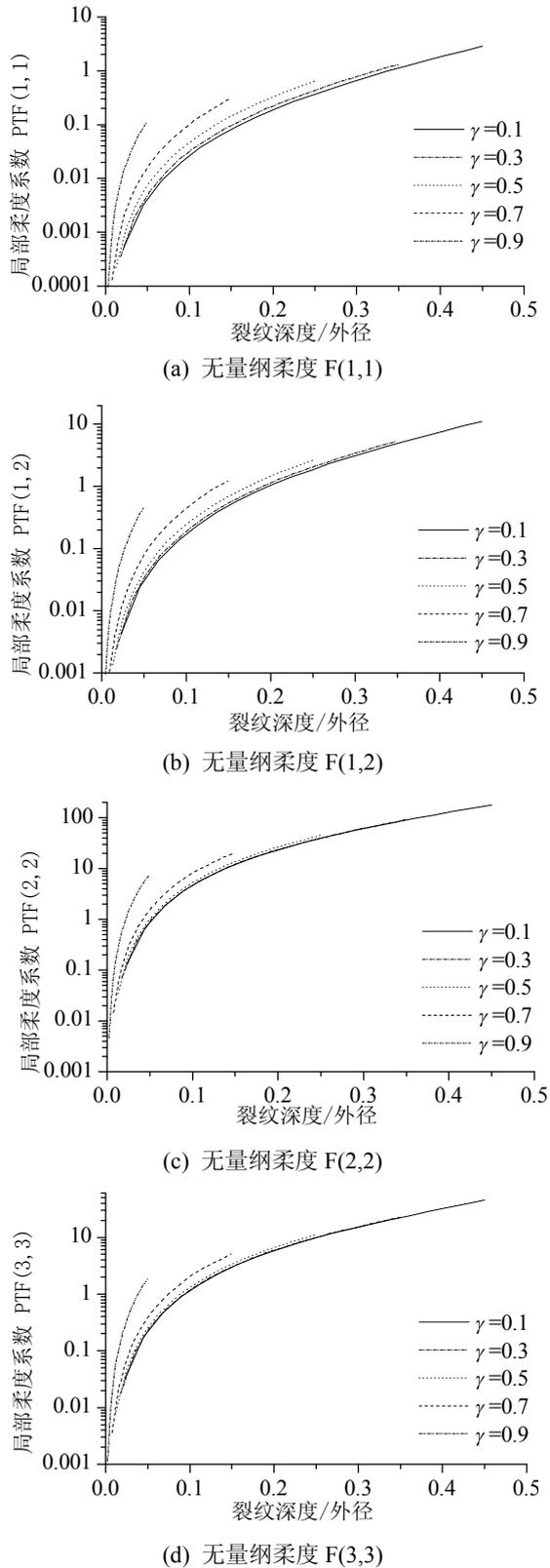


图 10 非贯穿直裂纹管的局部柔度系数

Fig.10 Local flexibility coefficients of pipe with a part-through crack

基于上述结果，将局部裂纹引入的附加柔度，通过传递矩阵方法将局部柔度系数耦合于管线动

力分析的“有限元模型”和“弹簧铰模型”，建立了高效率的含裂纹海底管线的动力分析方法。并且通过模型实验，制作了裂纹管线模型，测试了含裂纹管线的动力特性(如图 11、图 12)。将实验结果与本文提出的基于局部柔度的动力分析结果进行了比较，验证了本文方法的正确性和有效性。图 13 纵坐标为归一化的固有频率，其中 f_c 为含裂纹管的二阶固有频率， f_u 为无裂纹管的二阶固有频率。从图中可以看出：裂纹管固有频率的理论计算值与试验值基本吻合，归一化固有频率最大误差 $\epsilon_{\max} \leq 0.70\%$ ，试验中由于材料性质、边界条件、人为操作以及测试噪声等因素影响，在上述误差范围内，可以判定裂纹管的理论计算值是合理的。



图 11 线切割裂纹

Fig.11 Pipe crack by saw cutting

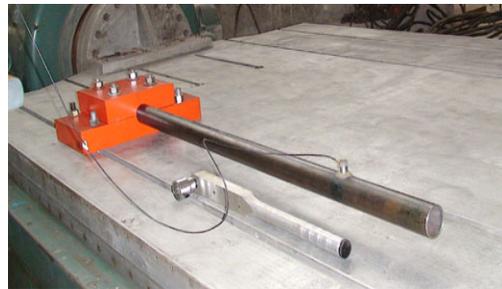


图 12 悬臂约束试验装置

Fig.12 Experimental setup for cantilever cracked pipe

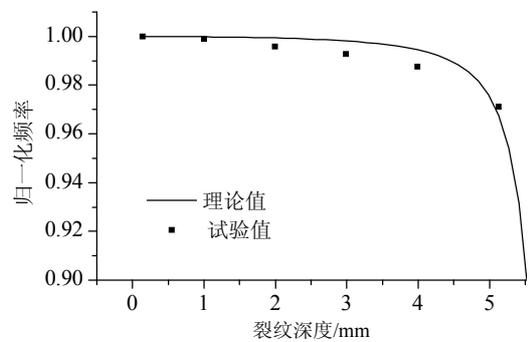


图 13 悬臂裂纹管固有频率计算值与试验值

Fig.13 Computational and experimental frequencies for cantilever cracked pipe

4 结构健康监测研究

4.1 基于光纤传感技术的海底管线健康监测系统^[15-16]

针对海底管线的荷载和环境特点,设计了适合海底管线健康监测的FBG应变和温度传感器。FBG应变传感器采用1.2mm不锈钢毛细钢管以及环氧树脂封装裸光纤光栅。其外形结构如图14所示。在设计传感器过程中,由于使用环氧树脂封装光纤光栅,其不均匀性使得光纤光栅受力不均,容易产生光纤光栅的多峰值现象,造成大量废品。因此,采用了特殊的方法预处理裸光纤光栅,消除了封装过程中产生的光纤光栅多峰值现象。设计了两种光纤光栅温度传感器,用以监测环境温度的变化。无增敏型光纤光栅温度传感器的温度传感特性与裸光纤光栅一致,为 $10.3\text{pm}/(^{\circ}\text{C})$;而增敏型光纤光栅温度传感器(如图15)与裸光纤光栅相比,其温度传感特性提高了2.7倍,温度分辨率可达 0.05°C 。并且通过水下振动台模型试验(图16),验证了FBG传感器实施海底管线健康监测的可行性。

采用多项先进软件开发技术,如java开发平台、面向对象的程序设计方法、多进程处理计算、X3D虚拟现实等,设计完成了“海底管线健康监测和安全评价系统”,取得了具有自主知识产权的软件成果(如图17)。开发成果综合运用信息、数据库、网



图14 FBG应变传感器
Fig.14 FBG strain sensor

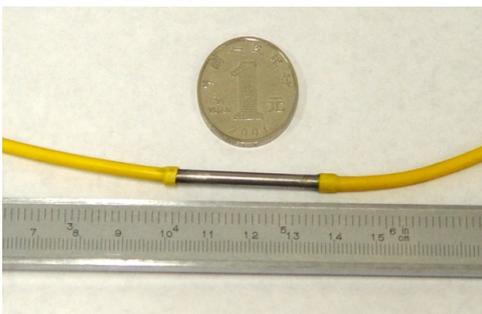


图15 FBG温度传感器
Fig.15 FBG temperature sensor

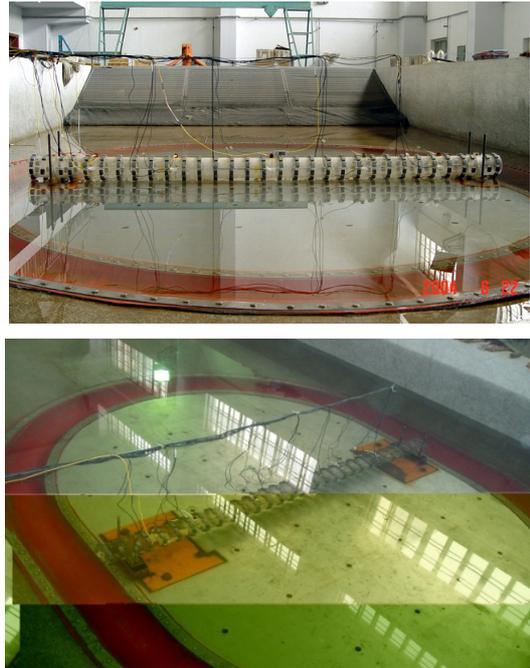
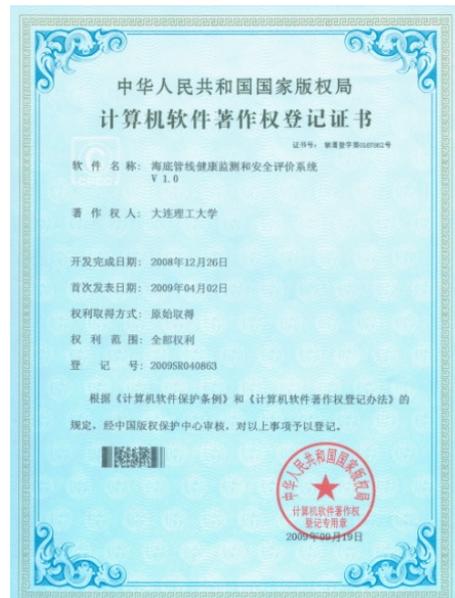


图16 基于FBG传感器的海底管线健康监测的实验验证
Fig.16 Experimental verification for FBG-based pipeline health monitoring

络通讯和综合评价理论,研究出解决“监测采集系统”与“海底管线健康监测和安全评价系统”对接、海底管线与监测设备的可视化虚拟仿真和网络发布、海量监测数据的优化管理等关键问题的理论和方法,成果满足X3D互联网3D图形国际通用软件标准,保证了系统成果的通用性和开放性。运用研究的成果理论,结合海底管线动力模型实验开发出基于C/S与B/S相结合模式的数据对接服务系统、管线健康综合评价模型服务系统和“海底管线健康监测和安全评价系统”应用实例。



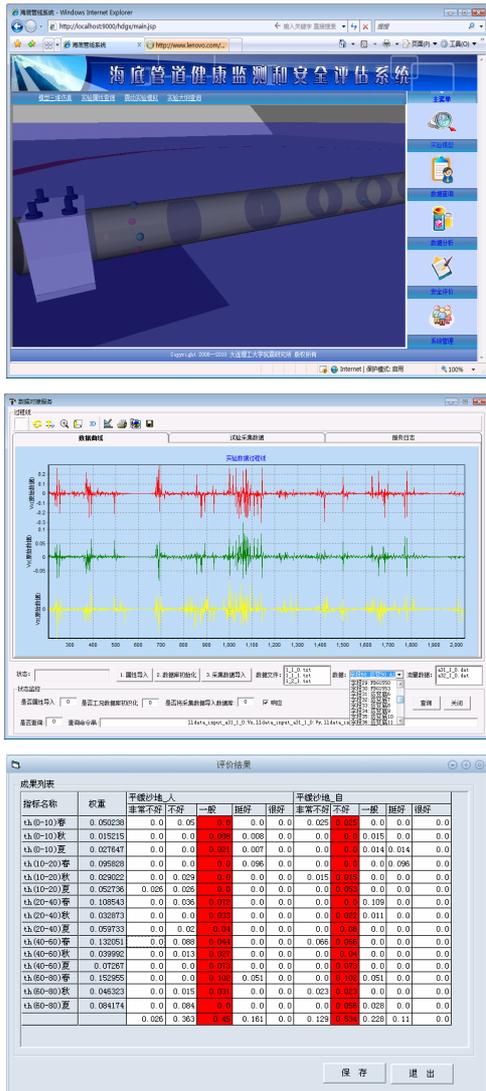


图 17 海底管线健康监测与安全评价系统

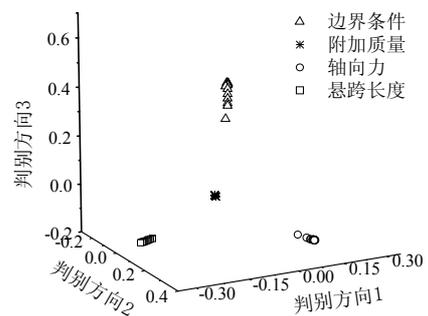
Fig.17 System of health monitoring and safety assessment for subsea pipeline

4.2 悬跨海底管线的结构状态识别^[17-19]

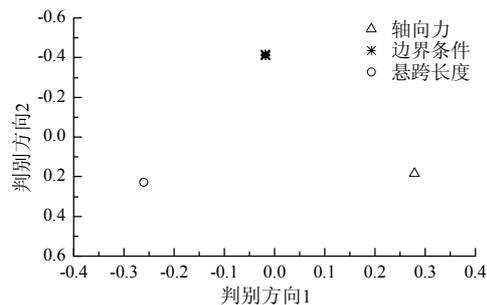
在铺设和服役过程中，由于海流的冲刷淘蚀以及海床的崎岖不平，悬跨段的出现不可避免。如果悬跨段的固有频率接近或者等于涡激发放频率，则会发生涡激共振现象，引起海底管线的疲劳损伤，严重威胁海底管线的安全运行。更为重要的是，悬跨海底管线的荷载与边界条件以及悬跨长度，也会随着环境、荷载的改变而发生随时间的演化，使得悬跨海底管线的结构状态呈现复杂的时变特性。现有的水下检测和管线监测技术，难以实时探知悬跨海底管线结构状态的变化，无法正确进行结构模型修正与性态评估。

通过有限元数值模拟，分析了海底管线基本动力特性的非线性演化规律，获得了悬跨海底管线的自振特性与边界土体特性、海水流速、管线轴向力

以及悬跨程度的相互关系。在此基础上，挖掘了自振频率所反映的结构状态信息，提取了悬跨海底管线的状态敏感特征，给出了结构状态敏感特征矢量的选取方法，提出了基于核判别分析的悬跨海底管线结构状态识别算法，并通过实例分析和模型试验分别验证了该方法的有效性(如图 18)。研究结果表明，通过构造合理的结构状态敏感矢量，核判别分析方法能够挖掘悬跨管线状态矢量的不同特征，寻找状态空间内最有利于状态分类的判别方向，为基于海底管线动力监测数据的结构状态识别提供了一种有效方法。



(a) 结构状态识别的数值模拟结果



(b) 结构状态识别的实验验证

图 18 悬跨海底管线的结构状态识别

Fig.18 Structural status identification for subsea free-spanning pipeline

4.3 基于非线性动力特性的海底管线裂纹识别方法^[20-21]

海底管线的裂纹识别仍然是海底管线健康监测研究最具挑战性的课题之一。悬跨管道受海底交

变环境荷载的往复作用,不可避免地存在疲劳裂纹。不同于一般的梁类结构,悬跨管道是一种复杂的空心圆柱壳体结构,具有明显的三维效应,而目前对含疲劳裂纹的管道结构的动力特性进行深入研究。本文引入“呼吸”裂纹模型描述疲劳裂纹的非线性时变特性,使用与上一节相同的接触分析方法建立了非扩展疲劳裂纹悬跨管道的三维非线性动力模型,使用 Newmark-B 法和修正的 Newton 迭代方法进行非线性动力方程求解。在此基础上,研究了简谐荷载作用下“呼吸”裂纹悬跨管道的 1/2 超谐共振行为,根据不同裂纹深度条件下管道超谐共振的能量分布特点,提出了一种用于裂纹程度识别的损伤敏感特征。

通过研究发现,对于不同的裂纹深度,悬跨管道谐振信号中的谐波成分能量幅值分布发生了明显变化,裂纹深度变化与结构一阶频率对应谐波的能量幅值存在着一定的联系。此现象在“呼吸”裂纹梁的非线性动力分析中也同样存在。为此,定义如下的表达式作为损伤敏感特征:

$$ERNF = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

其中: A_1 为第 1 个谐波频率的能量幅值; A_2 为第 2 个谐波频率的能量幅值。图 19 为裂纹深度 s 由 0.2 发展到 0.6 所对应的 $ERNF$ 曲线。从图 20 中可以看出:随着裂纹深度的增加,系统的 $ERNF$ 值呈单调递增变化。对于已经存在的疲劳裂纹,裂纹位置不会随意变动,而裂纹深度会随着结构服役期限的增长而扩展。因此, $ERNF$ 可作为一个损伤敏感特征,用来监测裂纹悬跨管道的裂纹程度。

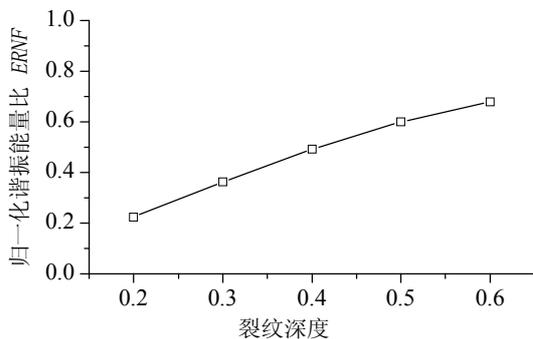


图 19 不同裂纹深度的 $ERNF$ 值

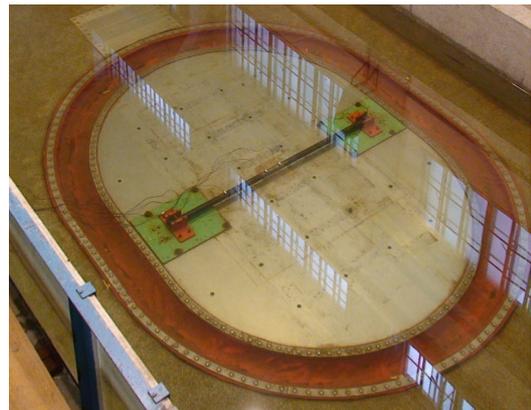
Fig.19 Energy ratios of frequency with different crack depth

为了深入认识含疲劳裂纹悬跨管道的非线性动力特性,以及验证本文提出的损伤敏感特性 $ERNF$ 的实际工程应用能力,进行了含疲劳裂纹悬跨管道的动力模型试验(如图 20)。采用美国 MTS

公司 New810 型万能试验机进行三点弯曲疲劳试验。将裂纹管线固定于水下地震模拟系统,研究了外部激励频率对疲劳裂纹悬跨管道的非线性动力特性的影响,获得了无裂纹、轻度、中等、重度等疲劳裂纹悬跨管道的损伤敏感特征 $ERNF$ (如图 21),利用悬跨管线的非线性动力特性识别了疲劳裂纹的发生与扩展的情况。



(a) 试验预制的疲劳裂纹



(b) 管线谐振试验装置

图 20 疲劳裂纹海底管线试验装置图

Fig.20 Experimental setup of subsea pipeline with fatigue crack

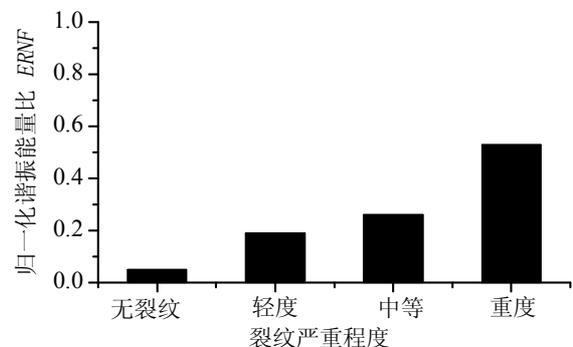


图 21 水下含不同程度裂纹悬跨管道的 $ERNFs$ 值

Fig.21 $ERNFs$ for free spanning pipeline with respect to different crack severity

5 结论和展望

海洋油气资源的开发利用, 已经成为我国突破能源瓶颈问题的基本战略。海底管线是海上油田的生命线, 担负海上油气集输的重要任务。但是由于工作荷载与环境因素的长期效应, 以及极端荷载等偶然因素的突然袭击, 国内外海底管线的安全事故时有发生。海底管线全寿命安全运行, 已经成为当前油气资源开发中迫切需要解决的关键问题, 所涉及的核心问题可归纳为:

(1) 结构损伤机理与分析理论。

(2) 结构健康监测技术。结构分析理论与健康监测技术不但是海底管线全寿命安全运行的两个重要支柱, 而且理论分析-数值模拟-现场监测研究的相互融合, 已经成为该领域未来发展的前沿方向。

海底管线全寿命安全运行研究涉及结构力学、流体力学、岩土力学、可靠度理论、信息科学、智能材料与结构、现代测控技术、数字信号处理、模式识别等, 是一个诸多传统学科与现代高科技交叉、融合的研究领域, 它的研究进展必将有力的推动和促进我国海洋石油工程科学及相关领域的发展。基于对国内外研究现状的分析, 未来应在以下关键科学问题上取得突破:

(1) 开展足尺寸或大尺寸管线模型实验, 揭示海底管线在内压-弯矩-轴力联合作用下的破坏机理与失效模式, 提出复杂荷载作用下管线结构的极限承载力计算公式。

(2) 采用物理模拟与数值仿真相结合的方法, 研究悬跨海底管线的涡激振动机理, 建立高性能的涡激振动分析模型和数值求解方法。

(3) 采用室内实验与现场监测相结合的混合试验方法, 揭示海底管线材料老化与损伤累积的真实物理机制, 提出考虑时间、环境效应的材料本构关系。

(4) 基于损伤力学理论发展海底管线的精细化数值仿真方法, 并且考虑海底管线损伤缺陷的三维效应, 提出海底管线多轴疲劳的高效分析算法。

(5) 研制适合海底环境的, 高耐久性、高精度的分布式传感元件与网络, 实现海底管线荷载、响应以及损伤演化的实时监测。

(6) 发展基于监测数据的海底管线实时损伤识别与安全评估的理论和方法, 建立海底管线全寿命

风险指标体系与多级安全预警系统。

参考文献:

- [1] 周晶, 李昕, 范颖芳. 海底悬跨管线地震反应分析[C]. 第十二届结构工程学术会议, 工程力学(增刊), 2003, v(1): 131-144.
Zhou Jing, Li Xin, Fan Yingfang. Earthquake response analysis of submarine free-spanning pipeline [C]. Proceedings of the Twelfth National Conference on Structural Engineering, Engineering Mechanics, 2003, v(1): 131-144. (in Chinese)
- [2] 余建星, 罗延生, 方华灿. 海底管线管跨涡激振动响应的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 93-97.
Yu Jianxing, Luo Yansheng, Fang Huacan. A test study on dynamic response of submarine pipeline spans [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 93-97. (in Chinese)
- [3] 欧进萍, 段忠东, 肖仪清. 海洋平台结构安全评价: 理论、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Ou Jingping, Duan Zhongdong, Xiao Yiqing. Safety assessment of offshore platform: theory, method and application [M]. Beijing: Academic Press, 2003. (in Chinese)
- [4] Houser G W, Bergman L A, et al. Structural control: past, present and future [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 123(9): 897-971.
- [5] 董汝博, 李昕, 金峤, 周晶. 多点输入下悬跨海底管道非线性地震响应参数分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7): 103-109.
Dong Rubo, Li Xin, Jin Qiao, Zhou Jing. Nonlinear parametric analysis of free spanning submarine pipelines under spatially varying earthquake ground motions [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(7): 103-109. (in Chinese)
- [6] 董汝博, 周晶, 冯新. 一种考虑局部场地收敛性的多点地震动合成方法[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 5-9.
Dong Rubo, Zhou Jing, Feng Xin. A local convergent method for simulating multi-point earthquake ground motion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 5-9. (in Chinese)
- [7] 董汝博, 李昕, 金峤, 周晶. 地震作用下海底悬跨管道水动力计算模型[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(2): 245-250.
Dong Rubo, Li Xin, Jin Qiao, Zhou Jing. Hydrodynamic force model for free spanning submarine pipeline under earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(2): 245-250. (in Chinese)
- [8] 李昕, 董汝博, 冯新, 周晶. 基于 Morison 方程的三维地震作用下海底悬跨管道计算模型[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 197-201, 213.
Li Xin, Dong Rubo, Feng Xin, Zhou Jing. Analytical model based on Morrison equation for free spanning

- submarine pipeline under earthquakes [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(4): 197–201, 213. (in Chinese)
- [9] Chen Yanfei, Li Xin, Zhou Jing, Guan Jiong. Study on interaction relationship for submarine pipeline with axial corrosion defects [J]. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(3): 359–370.
- [10] 陈严飞, 李昕, 周晶. 组合荷载作用下腐蚀缺陷管道的极限承载力[J]. *计算力学学报*, 2011, 28(1): 132–139.
Chen Yanfei, Li Xin, Zhou Jing. Ultimate flexural capacity of pipe with corrosion defects subject to combined loadings [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(1): 132–139. (in Chinese)
- [11] 陈严飞, 李昕, 周晶. 不规则腐蚀缺陷管道极限承载力研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(11): 190–196.
Chen Yanfei, Li Xin, Zhou Jing. Ultimate bending capacity of pipe with arbitrary corrosion defects [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(11): 190–196. (in Chinese)
- [12] 胡家顺, 冯新, 周晶. 圆周非贯穿裂纹管局部柔度的理论和试验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(4): 37–43.
Hu Jiashun, Feng Xin, Zhou Jing. Theoretical and experimental study on local flexibility of pipe with a part-through circumferential crack [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(4): 37–43. (in Chinese)
- [13] 胡家顺, 冯新, 周晶. 非贯穿直裂纹管局部柔度的理论研究[J]. *计算力学学报*, 2011, 28(1): 140–145.
Hu Jiashun, Feng Xin, Zhou Jing. Theoretical study on local flexibility of pipe with a part-through straight front crack [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(1): 140–145. (in Chinese)
- [14] 胡家顺, 冯新, 周晶. 含非贯穿直裂纹管道的振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(4): 21–25.
Hu Jiashun, Feng Xin, Zhou Jing. Vibration analysis and crack identification of a cantilever pipe with a circumferential part-through crack [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(4): 21–25. (in Chinese)
- [15] Ren L, Li H N, Zhou J, et al. Application of tube-packaged FBG strain sensor in vibration experiment of submarine pipeline model [J]. *China Ocean Engineering*, 2006, 20(1): 155–164.
- [16] Ren L, Li H N, Zhou J, et al. Health monitoring system for offshore platform with fiber Bragg grating sensors [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 084401-1–084401-8.
- [17] 胡家顺, 冯新, 周晶. 考虑边界土体性质悬跨管道振动特性分析[J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(3): 409–415.
Hu Jiashun, Feng Xin, Zhou Jing. Analysis of vibration characteristics of free span pipeline considering boundary soil property [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, 50(3): 409–415. (in Chinese)
- [18] Hu Jiashun, Feng Xin, Li Xin, Zhou Jing. Condition identification based on vibration measurements for free spanning submarine pipelines [J]. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(4): 561–574.
- [19] 胡家顺, 冯新, 李昕, 周晶. 海底悬跨管道的状态识别[J]. *工程力学*, 2009, 26(1): 238–243.
Hu Jiashun, Feng Xin, Li Xin, Zhou Jing. Condition identification for free spanning submarine pipeline [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(1): 238–243. (in Chinese)
- [20] 胡家顺, 冯新, 李昕, 周晶. 裂纹梁振动分析与裂纹识别方法研究进展[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(11): 146–151.
Hu Jiashun, Feng Xin, Li Xin, Zhou Jing. State-of-art of vibration analysis and crack identification of cracked beams [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11), 146–151. (in Chinese)
- [21] 胡家顺, 冯新, 周晶. 呼吸裂纹梁非线性动力特性研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 28(1): 76–80, 87.
Hu Jiashun, Feng Xin, Zhou Jing. Study on nonlinear dynamic response of a beam with a breathing crack [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 28(1): 76–80, 87. (in Chinese)

注: 该文在第 20 届结构工程学术会议(2011 宁波)应邀作特邀报告